

UNIVERSIDADE DE LISBOA

FACULDADE DE CIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



**MAGNETOTELÚRICA APLICADA À
PROSPECÇÃO MINEIRA**

Paula Maria Alves Póvoa

Mestrado em Geologia Económica
(Especialização em Prospecção Mineral)

2011

UNIVERSIDADE DE LISBOA

FACULDADE DE CIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



MAGNETOTELÚRICA APLICADA À PROSPECÇÃO MINEIRA

Paula Maria Alves Póvoa

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências da Universidade de
Lisboa para a obtenção do grau de Mestre em Geologia Económica

Orientador: Fernando Santos (FCUL)

Mestrado em Geologia Económica
(Especialização em Prospecção Mineral)

2011

Resumo

O núcleo industrial mineiro que vulgarmente se designa por “Minas da Panasqueira” situa-se na província da Beira Baixa, a cerca de 34 km da cidade do Fundão. Este inclui os coutos da Panasqueira e de Vale da Ermida, abrangendo uma área total de 20,5 km².

Geologicamente, este Couto Mineiro localiza-se na zona Centro-Ibérica, em pleno Complexo Xisto-Grauváquico, de idade pré-câmbrica. Este complexo metassedimentar encontra-se interrompido em grandes extensões por maciços graníticos gerados e instalados durante a Orogenia Hercínica.

O depósito da panasqueira consiste num depósito filoniano de W-Cu (Ag)-Sn, cuja génese se relaciona com a instalação/arrefecimento de corpos granitóides instalados em níveis crustais superiores (< 5 km de profundidade) durante o Paleozóico Superior. Estes corpos granitóides não afloram no Couto Mineiro da Panasqueira e, embora se pense que em profundidade possam existir vários, até aos dias de hoje apenas um foi intersectado pelos trabalhos mineiros (o granito da Panasqueira).

Estando os filões com relevância económica relacionados espacialmente com o granito da Panasqueira, o presente trabalho consistiu numa campanha de prospecção geofísica desenvolvida com o objectivo de se detectar a existência de outros corpos intrusivos, que poderão ter associados a si mais filões estano-volfrâmicos. Para tal usou-se um método electromagnético passivo, o método magnetotelúrico (MT), adequado para evidenciar contrastes de resistividade de grande escala, possibilitando a individualização em profundidade de corpos intrusivos mais resistivos, envolvidos por um encaixante metassedimentar mais condutor.

Esta campanha envolveu duas etapas de aquisição de dados MT no campo, processamento dos mesmos e obtenção de modelos 2D e 3D de resistividade.

Os modelos 2D de resistividade revelaram a existência de três corpos resistivos: um correspondente ao granito da Panasqueira, um a SW do granito da Panasqueira (Zona Sul) e outro a NE do granito da Panasqueira (Zona Norte), bem como, contrastes de resistividade relacionados com as principais zonas de falha cartografadas na área. Estes modelos indicam a possibilidade da existência de um corpo intrusivo de grande extensão lateral, sugerindo a forma de um batólito, com três núcleos mais resistivos.

O modelo 3D de resistividades foi apenas obtido para a Zona Sul, permitindo uma melhor caracterização do corpo resistivo SW. Deste modo, evidenciaram-se algumas diferenças na morfologia deste corpo comparativamente ao que se observa nos modelos 2D, nomeadamente a profundidade a que este se encontra e as suas

dimensões. Observa-se ainda o prolongamento deste corpo resistivo para norte com o aumento de profundidade.

Palavras-chave:

Minas da Panasqueira, prospecção magnetotelúrica, inversão, resistividade aparente, intrusões graníticas, encaixante metassedimentar.

Abstract

The industrial mining area usually known as “Minas da Panasqueira” is located about 34 kms from the city of Fundão in Beira Baixa province. This mining area includes the mining areas of Panasqueira and Vale da Ermida, covering a total area of 20,5 km².

Geologically, this Mining Area lies in the central Iberian Zone, in the middle of Schist-Greywacke Complex of Pre-Cambrian age. This metasedimentary complex is interrupted, to a large extent, by massive granites emplaced during Hercynian orogeny. The Panasqueira deposit is a W-Cu (Ag)-Sn vein deposit whose genesis is related to the emplacement and cooling of granitoid bodies in the upper crust (< 5 km depth) during upper Paleozoic. These granitoid bodies do not crop out in the Panasqueira Mining Area and although it is thought that several of them may exist in depth, only one was intercepted by mining works (Panasqueira granite).

As economic veins are related with the Panasqueira granite, the present work deals with a prospecting geophysics campaign carried out in order to prove the existence of other intrusive bodies that may be associated with more tungsten-tin veins. For the propose it a passive electromagnetic method was used – Magnetotellurics (MT), which is appropriate to show resistivity contrasts, allowing depth individualization of more resistive intrusive bodies that are wrapped in a more conductive metasedimentary rock. This campaign involved two field data acquisition phases, data processing and calculation of 2D and 3D resistivity models.

The 2D resistivity models show the existence of three resistive bodies: one whose location corresponds to the Panasqueira granite, a second one located SW of Panasqueira granite (South Zone) and a third one located NE of Panasqueira granite (North Zone) as the resistive contrasts of the main mapped fault zones. These models

indicate a possible lateral extensive intrusive body, suggesting the shape of a batholith with three resistive cores (R1, R2 and R3).

The 3D resistivity model was only calculated for the South Zone, allowing a better characterization of the resistive SW body (R1). For this body several differences are evident when compared with the 2D models, including its dimension and depth. A northern extension of the body with increasing depth is also noticed.

Key-words:

Panasqueira Mine, magnetotellurics prospecting, inversion, apparent resistivity, granitic intrusions, metasedimentary enclosing rocks.

Agradecimentos

O meu muito especial agradecimento, por todo o conhecimento, apoio, disponibilidade, atenção e amizade facultados pelo Professor Doutor Fernando Santos, ao longo da elaboração deste trabalho, e pelo Professor Doutor António Mateus, ao longo deste biénio 2010/2011.

Agradeço igualmente ao Professor Doutor Jorge Relvas pelo imprescindível incentivo que criou em mim para a concretização deste mestrado e por todo o apoio e amizade. Um agradecimento à Beralt Tin & Wolfram S.A., por possibilitarem este trabalho de prospecção e pela gentil cedência de dados e bibliografia, mais propriamente ao Dr. Paulo Ferraz e ao Dr. Jaques Ribeiro.

Não poderia deixar de agradecer também aos colaboradores/investigadores do Laboratório de Geofísica Aplicada: Joana Ribeiro, Ivo Bernardes, António Soares e Filipe Adão, pelo acolhimento, amizade e boa disposição e ao João Plancha pelo interesse, apoio e ajuda nas mais variadas questões.

Finalizando, quero deixar um agradecimento especial à minha família cujo apoio e incentivo foram imprescindíveis ao longo deste percurso, em especial à minha mãe pelo carinho e preocupação constantes.

Índice Geral

Índice Geral	V
Introdução.....	1
Capítulo I - Minas da Panasqueira	3
1. Enquadramento histórico	4
1.1. Breve história do volfrâmio em Portugal	5
1.2. Perspectiva histórica da actividade mineira	7
2. Enquadramento geológico-estrutural.....	10
2.1. Geologia da Região Mineira	10
2.2. Geologia do Jazigo	16
2.2.1. Metamorfismo de contacto	16
2.2.2. Greisenização	17
2.2.3. Lentícula de quartzo (“Silica Cap”)	19
2.2.4. Sistema de filões da Panasqueira	20
2.2.5. Sucessão mineral dos filões (sequência paragenética)	23
2.2.6. Temperaturas e pressões de fluídos da formação dos veios minerais	25
2.3. Geologia económica	26
2.4. Tectónica regional.....	28
2.5. Metalogénese	31
Capítulo II - Método de Prospecção Magnetotelúrica (MT)	34
1. Casos em que os estudos electromagnéticos são úteis	37
2. Conceitos teóricos básicos de MT	42
2.1. Invariância temporal.....	43
2.2. Conceito de função de transferência	44
2.3. Indução num meio estratificado: conceito de resistividade aparente e fase	44
2.4. Indução em discontinuidades: modelo de Terra bidimensional e o conceito	45
de polarização E e B.....	45
2.5. O tensor das impedâncias e dimensionalidade	47
2.5.1. Direcções de strike (direcções regionais de camada)	47
2.5.2. Tensor das impedâncias	47
3. Planear uma campanha de aquisição de dados MT	49
3.1. Profundidades pretendidas e a escolha dos sensores e equipamentos	49
adequados.....	49
3.1.1. Tempo de aquisição.....	49
3.1.2. Sensores magnéticos e eléctrodos	50
3.1.3. Fontes externas de ruído	50
3.1.4. Material fundamental para instalar uma estação de MT	51
4. Processamento de dados.....	52

4.1. Apresentação de dados	54
5. Distorção.....	55
5.1. Static shift	55
5.1.1. Métodos de correcção do static shift:	56
6. Modelação directa e inversão de dados MT	56
Capítulo III - Modelação tridimensional (3D)	58
1. Porquê efectuar modelação 3D.....	59
2. Elaboração de uma malha e condições de fronteira	60
3. Desajustes	62
Capítulo IV - Campanha de prospecção MT da Panasqueira – Análise e discussão de dados e modelos.	65
1. Campanha de prospecção MT	66
2. Perfil Inicial (modelos 2D)	68
2.1. Aquisição de dados do Perfil Inicial.....	68
2.2. Análise preliminar dos dados	69
2.3. Modelos 2D obtidos por inversão	76
2.3.1. Análise dos Modelos 2D de resistividade	78
2.3.2. Testes de sensibilidade.....	79
2.3.3. Discussão/interpretação dos modelos 2D de resistividade	92
3. Zona Sul (modelo 3D)	97
3.1. Aquisição de dados da malha 3D.....	97
3.2. Análise preliminar dos dados	98
3.3. Modelo 3D obtido por inversão.....	105
3.3.1. Análise do modelo 3D de resistividade.....	109
3.3.2. Discussão/interpretação do modelo 3D de resistividade	113
Conclusões.....	115
Bibliografia.....	118
Anexos	122

Índice de figuras

Figura 1 – Mapa geológico simplificado de Portugal continental com a localização do Couto Mineiro da Panasqueira. Fonte: Instituto Geológico e Mineiro, actual LNEG.....	4
Figura 2 – Distribuição das mineralizações estano-volframíticas (Ribeiro e Pereira, 1982).....	6
Figura 3 – Antiga Lavaria do Rio (Cabeço do Pião).....	7
Figura 4 – Lavaria da Barroca Grande.....	8
Figura 5 – Evolução do preço do volfrâmio desde 1965 até 2002.....	9
Figura 6 – Excerto da carta Geológica 1:500 000 dos SGP (1992). Enquadramento do jazigo da Panasqueira, assinalando o alinhamento E-W (Góis-Pedra Alta) referido em numerosos trabalhos clássicos (Neiva, 1944; Thadeu 1951).....	11
Figura 7 – Legenda da figura 6, SGP (Oliveira, Pereira, Ramalho, Antunes e Monteiro, 1992).....	12
Figura 8 – Mapa geológico do Couto Mineiro da Panasqueira (Thadeu, 1951).....	13
Figura 9 – Corte geológico segundo o painel P4 onde é possível observar a cúpula granítica da Panasqueira e a sua relação espacial com o sistema filoniano (Bussink, 1984).....	18
Figura 10 – Corte geológico onde é possível observar a cúpula do greisen e a “Silica Cap” no seu ápice (Noronha <i>et al.</i> , 1991).....	19
Figura 11 – Filão sub-horizontal do jazigo da Panasqueira. Fornecido pela Beralt Tin & Wolfram S.A.....	21
Figura 12 – Salbanda moscovítica e volframite na zona superior de um filão de quartzo leitoso sub-horizontal (Lourenço, 2002).....	22
Figura 13 – Sulfuretos (pirite e calcopirite) a crescer na zona central de um filão de quartzo mineralizado (Lourenço, 2002).....	22
Figura 14 – Quadro paragenético das mineralizações de W-Sn-Cu do jazigo da Panasqueira. As linhas a tracejado indicam um hiato deposicional na sucessão mineralógica (Lourenço, 2002).....	25
Figura 15 – Modelo de instalação de um granito pós-tectónico (Ribeiro e Pereira, 1982).....	33

- Figura 16** – Espectro de potência ilustrando as características das variações magnéticas naturais. Os sinais correspondentes a períodos pequenos são gerados pela interacção Terra-Ionosfera. Sinais correspondentes a períodos longos são gerados pela interacção ventos solares-magnetosfera. Detalhe acerca da redução de potência da “dead-band” (Simpson e Bahr, 2005).....36
- Figura 17** – Deformação das linhas do campo magnético da magnetosfera terrestre causada pela interacção com os ventos solares (Simpson e Bahr, 2005).....37
- Figura 18** – Variação da resistividade consoante a concentração de KCl em solução aquosa (Simpson e Bahr, 2005).....38
- Figura 19** – Campo magnético externo variável com o tempo, B_e , que de acordo com a lei de Faraday induz um campo eléctrico E , o qual induz um campo magnético interno secundário B_i , de acordo com a lei de Ampere (Simpson e Bahr, 2005).....43
- Figura 20** – Semi-espaço com N camadas (Simpson e Bahr, 2005).....44
- Figura 21** – Curvas de Resistividade aparente e fase geradas em meios estratificados nos quais: (a) a resistividade decresce em profundidade, com uma fase inicial de 45° , nos períodos mais pequenos, que aumenta ligeiramente a partir dos 10 Hz, consistente com o decréscimo da resistividade; (b) aumento da resistividade com a profundidade e fase de 45° , nos períodos mais pequenos, a qual posteriormente decresce, consistentemente com o aumento da resistividade; (c) representa uma camada de 10 Km na crosta média, com valores elevados de resistividade (Simpson e Bahr, 2005).....45
- Figura 22** – Modelo 2D de um semi-espaço com um contacto vertical a separar dois meios com condutividades diferentes, onde se observam polarizações E e B (Simpson e Bahr, 2005).....45
- Figura 23** – Comparação entre curvas de resistividade aparente e fase, correspondentes a polarizações E e B, em função da distância ao contacto vertical observado na figura 6, para os períodos de 0.1 e 10 s. Observa-se que, enquanto a resistividade aparente da polarização E varia pouco através da descontinuidade, a resistividade aparente da polarização B é descontínua (Simpson e Bahr, 2005).....46
- Figura 24** – Imagem esquemática de uma estação MT (Simpson e Bahr, 2005).....51
- Figura 25** – Segmento de série temporal de dados adquiridos na Panasqueira (2010).....52
- Figura 26** – Representação esquemática das etapas de processamento de dados MT (Simpson e Bahr, 2005).....53
- Figura 27** – Resistividade aparente e fase em função do período de uma estação MT montada na Panasqueira (2010).....54
- Figura 28** – Modelo de resistividades 2D obtido por inversão (Simpson e Bahr, 2005).....54
- Figura 29** – **a)** Modelo 2D; **b)** e **c)** modelos 1D, com diferentes valores de resistividade para a camada de 0 a -5 Km; **d)** comparação de curvas de resistividade aparente e fase de um local afastado 300 m da fronteira lateral do modelo a) e curvas de resistividade e fase obtidas dos modelos b) e c). Para períodos longos, as

resistividades aparentes 1D e polarização E do 2D, convergem para 100 Ω .m, valor correspondente à resistividade entre os -5 a -410 km. A polarização B do 2D, em vez de convergir para 100 Ω .m, está deslocada por static shift num factor constante, para períodos acima dos 10 s (Simpson e Bahr, 2005).....55

Figura 30 – Exemplo de uma malha 3D. A secção horizontal (em cima) consiste em 103 x 119 células e representa uma área de 858 x 923 Km². Os pontos a preto simbolizam as estações MT efectuadas que se situam no centro da malha, onde as dimensões das células são 5 x 5 Km². A secção vertical (em baixo) contém 34 camadas e vai até uma profundidade de 420 Km (Simpson e Bahr, 2005).....62

Figura 31 – Duas curvas de fase (com linha a tracejado, uma com triângulos e outra com círculos) com o mesmo valor de desajuste (ε^2) relativamente à curva de fase representada pela linha a cheio (com círculos escuros). No entanto, as formas das duas primeiras curvas são diferentes (Simpson e Bahr, 2005).....63

Figura 32 – Localização das estações de MT no couro mineiro da Panasqueira. Estão representadas: a vermelho, as estações do Perfil Inicial; a verde, as estações da Zona Sul e a azul, as estações da Zona Norte.....67

Figura 33 – Localização do Perfil Inicial. Imagem do Google Earth.....68

Figura 34 – Exemplo de um segmento de série temporal da banda LF1 (altas frequências) para os canais eléctricos e magnéticos (Ex, Ey, Hx, Hy). O eixo dos yy corresponde à amplitude em mv e o eixo dos xx corresponde ao tempo em horas. Os segmentos a sombreado correspondem a segmentos de ruído retirados.....70

Figura 35 – Exemplo de um segmento de série temporal da banda LF2 (médias frequências) para os canais eléctricos e magnéticos (Ex, Ey, Hx, Hy). O eixo dos yy corresponde à amplitude em mv e o eixo dos xx corresponde ao tempo em horas. Os segmentos a sombreado correspondem a segmentos de ruído retirados.....70

Figura 36 – Exemplo de um segmento de série temporal da banda LF3 (baixas frequências) para os canais eléctricos e magnéticos (Ex, Ey, Hx, Hy). O eixo dos yy corresponde à amplitude em mv e o eixo dos xx corresponde ao tempo em horas. Os segmentos a sombreado correspondem a segmentos de ruído retirados.....71

Figura 37 – Curvas de resistividade aparente (curva da Ampl em ohm.m) e fase (curva da Phase) das 14 estações do perfil Inicial.....73

Figura 38 – (A) Curva de resistividade aparente e fase, da estação 6, antes da eliminação de pontos problemáticos. (B) Curva de resistividade aparente e fase, da estação 6, depois da eliminação de pontos problemáticos. O eixo dos xx de ambas as curvas correspondem às frequências em Hz.....74

Figura 39 – Direcção de “strike” para cada uma das sondagens.....76

Figura 40 – Modelo 1, obtido por inversão 2D, com erro (RMS) de 3,5. O eixo dos xx está em metros e o eixo dos yy está em Km. A linha a cheio representa a cota dos 600 m).....77

Figura 41 – Modelo 2, obtido por inversão 2D, com erro (RMS) de 3,5. O eixo dos xx está em metros e o eixo dos yy está em Km. A linha a cheio representa a cota dos 600 m).....77

Figura 42 – Modelo 3, obtido por inversão 2D, com erro (RMS) de 3,4. O eixo dos xx está em metros e o eixo dos yy está em Km. A linha a cheio representa a cota dos 600 m).....78

Figura 43 – **a** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 2 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação 2 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.....80

Figura 44 – **a** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 2 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação 2 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.....81

Figura 45 – **a** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 5 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação 5 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.....81

Figura 46 – **a** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 1 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação 1 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.....82

Figura 47 – **a** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 2 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação 2 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.....82

Figura 48 – **a** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 5 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação 5 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.....83

Figura 49 – **a** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 2 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação 2 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.....83

Figura 50 – **a** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 6 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação 6 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.....84

Figura 51 – **a** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 7 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação

7 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.....84

Figura 52 – a - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 6 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação 6 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.....85

Figura 53 – a - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 7 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação 7 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.....85

Figura 54 – a - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 4 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação 4 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.....86

Figura 55 – a - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 6 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação 6 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.....86

Figura 56 – a - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 7 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação 7 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.....86

Figura 57 – a - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 10 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação 10 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.....87

Figura 58 – a - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 11 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação 11 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.....87

Figura 59 – a - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 12 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação 12 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.....88

Figura 60 – a - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 13 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação

13 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.....88

Figura 61 – a - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 14 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação 14 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.....88

Figura 62 – a - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 15 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação 15 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.....89

Figura 63 – a - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 11 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação 11 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.....89

Figura 64 – a - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 12 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação 12 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.....90

Figura 65 – a - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 13 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação 13 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.....90

Figura 66 – a - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 11 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação 11 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.....91

Figura 67 – a - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 12 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação 12 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.....91

Figura 68 – a - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 13 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação 13 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.....91

Figura 69 – Modelo 3, obtido por inversão 2D, incorporando os corredores das falhas que intersectam o perfil Inicial. Da esquerda para a direita, respectivamente: Falha das Lameiras (a azul); Falhas 3W, Principal e do Masso (a cor-de-vinho); Falha da Cebola (a cinzento). A linha a cheio representa a cota dos 600 m.....93

- Figura 70** – Localização das estações de MT da Zona Sul (assinaladas com bandeiras). As estações assinaladas com balões vermelhos são as estações do perfil inicial que se incluíram na Zona Sul. Imagem do Google Earth.....97
- Figura 71** – Exemplo de um segmento de série temporal da banda HF (altas frequências – ADU07) para os canais eléctricos e magnéticos (Ex, Ey, Hx, Hy). O eixo dos yy corresponde à amplitude em mv e o eixo dos xx corresponde ao tempo em horas. Os segmentos a sombreado correspondem a segmentos de ruído retirados....99
- Figura 72** – Exemplo de um segmento de série temporal da banda LF1 (altas frequências – ADU06) para os canais eléctricos e magnéticos (Ex, Ey, Hx, Hy). O eixo dos yy corresponde à amplitude em mv e o eixo dos xx corresponde ao tempo em horas. Os segmentos a sombreado correspondem a segmentos de ruído retirados...99
- Figura 73** – Exemplo de um segmento de série temporal da banda LF2 (médias frequências) para os canais eléctricos e magnéticos (Ex, Ey, Hx, Hy). O eixo dos yy corresponde à amplitude em mv e o eixo dos xx corresponde ao tempo em horas. Os segmentos a sombreado correspondem a segmentos de ruído retirados.....100
- Figura 74** – Curvas de resistividade aparente (curva da Ampl em ohm.m) e fase (curva da Phase) das 19 estações da Zona Sul.....103
- Figura 75** – Cortes horizontais do modelo 3D para as profundidades de 185 m, 350 m, 500 m, 800 m, 1500 m e 2500 m. A localização das estações (representadas por pontos pretos) observa-se apenas na secção a 185 m de profundidade. As estações assinaladas por F fazem parte do Perfil Inicial. A estação 2F do perfil inicial não se encontra na figura por uma questão de representação, uma vez que a sua localização quase coincide com a da estação 14.....106
- Figura 76** – Cortes horizontais do modelo 3D para as profundidades de 300 m, 500 m, 700 m, 1000 m, 1500 m, 2000 m, 2500 m e 3500 m. As estações assinaladas com F foram adquiridas no Perfil Inicial, as que estão assinaladas com P foram adquiridas no segundo levantamento (Zona Sul).....109
- Figura 77a** – Isosuperfícies correspondente à resistividade de 1500 Ohm.m.....110
- Figura 77b** – Isosuperfícies correspondente à resistividade de 2000 Ohm.m.....111
- Figura 77c** – Isosuperfícies correspondente à resistividade de 2500 Ohm.m.....111
- Figura 77d** – Isosuperfícies correspondente à resistividade de 3000 Ohm.m.....111
- Figura 77e** – Isosuperfícies correspondente à resistividade de 3500 Ohm.m.....112
- Figura 78** – Localização das Falhas e das estações de MT na Zona Sul. Estão representadas a vermelho, as estações do Perfil Inicial e a verde, as estações da Zona Sul.....114

Índice de tabelas

Tabela 1 – Sucessão da cristalização do granito da Panasqueira da Barroca Grande e alterações tardi a pós-magmáticas (Lourenço, 2002).....	14
Tabela 2 – Resistividades de minerais e águas (Telford <i>et al</i> , 1990).....	39
Tabela 3 – Resistividades de minérios (Telford <i>et al</i> , 1990).....	40
Tabela 4 – Variação da resistividade das rochas com a variação do seu conteúdo em água (Telford <i>et al</i> , 1990).....	40
Tabela 5 – Resistividades de rochas (Telford <i>et al</i> , 1990).....	41
Tabela 6 – Tabela das gamas de frequências com os respectivos valores em Hertz..	70
Tabela 7 – Valores de Strike geoelectrico para cada estação MT (modelo de Torquil Smith).....	75
Tabela 8 – Tabela das gamas de frequências, com os respectivos valores em Hertz, medidas nas ADU06 e ADU07.....	100

Lista de símbolos

p – Profundidade de penetração (m)
T – Período (s)
f – Frequência (Hz)
μ - Permeabilidade magnética (H/m)
σ – Condutividade média (S/m)
ω – Frequência angular (s^{-1})
ρ_a – Resistividade aparente (Ohm.m)
j – Densidade de corrente (Am^{-2})
E – Campo eléctrico (V/m)
E_x, E_y – Componentes cartesianas de E
B – Campo Magnético (Tesla (T) = Vsm^{-2})
B_x, B_y, B_z – Componentes cartesianas de B
Z – Tensor de impedâncias
C – Função de transferência Schmucker-Weidelt (km)
ΔC – Intervalo de confiança dos dados
ε^2 – Desajuste do modelo

Introdução

O jazigo da Panasqueira localiza-se na província da Beira Baixa, a cerca de 34 km da cidade do Fundão. O couto mineiro inclui os coutos da Panasqueira e de Vale da Ermida, abrangendo uma área total de 20,5 km².

Trata-se de um depósito filoniano, situado em pleno Complexo Xisto-Grauváquico. Os filões quartzosos são maioritariamente sub-horizontais e encontram-se mineralizados em W-Cu (Ag)-Sn. Estes encontram-se situados adjacientemente a um batólito granítico, o granito da Panasqueira. Este granito faz parte do complexo granítico Hercínico do norte de Portugal, intruindo rochas do CXG Pré-Câmbrico. A parte superior da cúpula granítica encontra-se greisenizada e também ela é cortada por filões estano-volframíticos. O encaixante CXG engloba séries de rochas metassedimentares deformadas por metamorfismo regional, do qual resultou um forte dobramento e a aquisição de xistosidade orientada para NW-SE. Este metamorfismo terá ocorrido durante as fases iniciais da Orogenia Hercínica, não ultrapassando o grau metamórfico dos xistos-verdes. Os filões que formam o depósito encontram-se mineralizados essencialmente por quartzo (>90%), no entanto a sua importância económica deve-se à ocorrência de volframite (0,8%), cassiterite (0,04%) e calcopirite (1,1%) (Polya, 1989).

Embora no Couto Mineiro da Panasqueira seja apenas conhecido o granito da Panasqueira, muitos autores têm encontrado evidências na região que sugerem a presença de outros corpos graníticos em profundidade. Estes corpos intrusivos, tal como o granito da Panasqueira, poderão ter associados a si filões mineralizados, passíveis de exploração económica.

Uma vez que o depósito da Panasqueira tem sido explorado há mais de um século, torna-se fundamental desenvolver trabalhos de prospecção, que permitam localizar estes corpos intrusivos a fim de se aumentar o tempo de vida da exploração mineira.

O presente trabalho tenta contribuir para a resolução desta problemática, usando para o efeito um método de prospecção geofísico - o Método Magnetotelúrico (MT).

O método MT é um método que usa as fontes naturais de variação do campo electromagnético, de forma a predeterminar a estrutura condutora das camadas mais superficiais da Terra, a profundidades que variam entre dezenas de metro e centenas de quilómetros. As fontes naturais de flutuação do campo electromagnético estão principalmente associadas aos fenómenos de interacção entre o vento solar e a magnetosfera da Terra e às tempestades meteorológicas que ocorrem na atmosfera do planeta.

Uma vez que as intrusões graníticas, bastante resistivas, se encontram envolvidas por rochas metassedimentares (xistos e grauvaques) mais condutoras, o método MT deverá ser adequado, uma vez que permite localizar contrastes laterais de resistividade de grande escala, alcançando profundidades relativamente elevadas.

Deste modo, os principais objectivos deste trabalho são:

- aquisição de dados MT no Couto Mineiro da Panasqueira;
- processamento e interpretação geofísica dos dados MT;
- obtenção de modelos 2D e 3D de resistividade;
- análise e interpretação geológica dos modelos.

Dada a natureza do presente trabalho, o enquadramento geológico do Couto Mineiro da Panasqueira foi elaborado de forma a caracterizar os traços gerais, tanto da geologia regional como da geologia do jazigo, pelo que não foram pormenorizados dados geológicos mais específicos, nomeadamente estudos geoquímicos detalhados, estudos de inclusões fluídas e estudos isotópicos. Estes dados, contudo, podem ser consultados em variados estudos, como por exemplo: Clark (1964), Kelly e Rye (1979), Neiva (1987), Polyá (1989), Noronha *et al.* (1992, 2000), Lourenço (2002), entre outros.

Capítulo I - Minas da Panasqueira

Enquadramento histórico e enquadramento geológico- estrutural

1. Enquadramento histórico

As Minas da Panasqueira localizam-se no Complexo Xisto-Grauváquico, de idade pré-câmbrica. Este complexo metassedimentar, interrompido em grandes extensões por maciços graníticos gerados e instalados durante a Orogenia Hercínica, integra a região que se denomina “Bloco Setentrional do Maciço Hespérico”.

Geograficamente, o couro mineiro da Panasqueira situa-se a ocidente da Cova da Beira, depressão geomorfológica localizada entre as serras da Estrela e da Gardunha, que constitui a parte SW da Cordilheira Central (figura 1). No extremo sul do couro mineiro corre o Rio Zêzere que constitui a principal via de drenagem de todas as linhas de água da região e de onde se retirava a água indispensável ao tratamento/beneficiação de todo o minério extraído.

O núcleo industrial mineiro que vulgarmente se designa por “Minas da Panasqueira” estende-se por uma vasta zona, coberta pelos coutos da Panasqueira e de Vale da Ermida, abrangendo uma área total de 20,5 km².

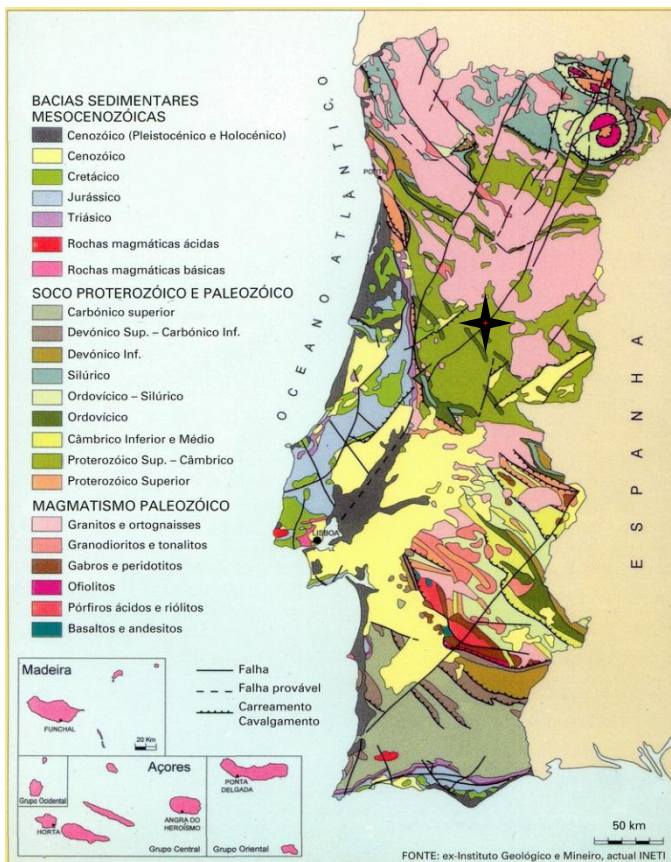


Figura 1 – Mapa geológico simplificado de Portugal continental. Fonte: Instituto Geológico e Mineiro, actual LNEG.

★ Localização do Couro Mineiro da Panasqueira.

As primeiras concessões mineiras remontam ao fim do século XIX, no entanto a exploração regular e contínua, data de 1934. Em 1937 a exploração atingiu o seu pleno desenvolvimento, tornando-se no principal produtor de volfrâmio na Europa e uma das principais fontes regulares de volfrâmio de todo o mundo (Pereira e Thadeu, 1971).

A Panasqueira é um depósito filoniano de W-Cu (Ag)-Sn, cuja génese se relaciona com a instalação/arrefecimento de corpos granitóides instalados em níveis crustais superiores (< 5 km de profundidade) durante o Paleozóico Superior. Embora o jazigo seja estano-volframítico, a importância da mineralização volframítica supera largamente a da cassiterite, ultrapassando as 70000 toneladas nos últimos 50 anos (> 75% WO₃) (Polya, 1989).

Nos últimos anos, com a exploração do sector poente do campo filoniano, passou a ser recuperada a calcopirite, cujos concentrados contêm quantidades variáveis de prata (Kelly e Rye, 1979).

1.1. Breve história do volfrâmio em Portugal

No início da década de setenta do século XVIII, foi possível, pela primeira vez, isolar o volfrâmio a partir dos seus mais importantes minérios: a volframite e a scheelite. A identificação das suas características (dureza, resistência, altas temperaturas de fusão, propriedades eléctricas e termo-iónicas, etc) permitiram descortinar e produzir materiais com propriedades antes desconhecidas. Com o desenvolvimento da capacidade tecnológica das sociedades mais industrializadas, novas utilizações foram encontradas para o volfrâmio, nomeadamente fabrico de aços diversos, filamentos de lâmpadas incandescentes, ferramentas metálicas, componentes para a indústria eléctrica e electrónica, nuclear e aeroespacial.

Em consequência da conjuntura da história mundial recente, marcada pela corrida aos armamentos convencionais e/ou pela eclosão de conflitos militares de grande dimensão, o volfrâmio revelou-se um metal indispensável e estratégico. Foi durante a 1ª Guerra mundial (1914-1918), a 2ª Guerra Mundial (1939-1945) e a Guerra da Coreia (1950-1953) que os esforços de prospecção, controlo e exploração das jazidas de volfrâmio se intensificaram e, devido à elevada procura, os seus preços atingiram níveis nunca antes imagináveis.

Foi em 15 de Novembro de 1871 que foi concessionada a primeira mina portuguesa de volfrâmio, com o nome de Mina da Ribeira, no concelho de Bragança. Desde então,

Paula Póvoa

1.2. Perspectiva histórica da actividade mineira

A história das Minas da Panasqueira, como qualquer mina com importância económica, apresenta um percurso indissociável da história do próprio país. Na sua longa actividade registam-se alguns percalços e mesmo paralisações, muitas das quais induzidas por factores económicos, tais como: a cotação do minério no mercado, a utilidade face aos desenvolvimentos da Sociedade, assim como factores de ordem histórica como a 1ª e 2ª guerras mundiais.

Os primórdios da exploração do volfrâmio remontam ao séc. XIX, sendo o primeiro registo oficial das Minas da Panasqueira datado de 25 de Novembro de 1898, com a publicação no Diário do Governo da autorização da seguinte concessão: “*Sociedade de Minas de Volfram em Portugal, Lisboa. Por a firma Almeida, Silva Pinto & Comandita, Exploradora de minas de Volfram, existentes no Fundão e Covilhã, com sede em Lisboa.*” Esta concessão abrangia as freguesias de Cebola (S. Jorge da Beira) e Bodelhão (Aldeia de S. Francisco de Assis) pertencentes ao concelho da Covilhã e Cabeço do Pião-Rio integrados no concelho do Fundão. Mais tarde as explorações alargaram-se para novas áreas, tais como: Vale das Freitas, Vale das Ermidas e Barroca Grande, sendo esta última onde se centrou a maioria da exploração do jazigo da Panasqueira. Todas estas concessões foram posteriormente integradas numa só área mineira – Couto Mineiro da Panasqueira.

O interesse dos ingleses pela mina teve início em 1904, quando a Conde Burnay inicia a construção da primeira lavaria mecanizada, localizada no Rio Zêzere, denominada lavaria do rio, como se observa na figura 3.



Figura 3 – Antiga Lavaria do Rio (Cabeço do Pião).

Em 1911 constituiu-se a empresa inglesa Wolfram Mining and Smelting Company, que desenvolveu a Mina, investindo em máquinas e na renovação da Lavaria do Rio, instalando um cabo aéreo para transportar o minério dos vários sectores do couro mineiro para a lavaria. Com o início da Primeira Guerra Mundial assistiu-se a um grande desenvolvimento da Mina, devido às necessidades da indústria militar. A produção aumentou e a lavaria foi ampliada e apetrechada com um forno para o tratamento do minério.

Entre a 1ª e a 2ª Guerra Mundial a Mina passou por algumas dificuldades havendo uma recuperação do preço do volfrâmio até ao fim da 2ª Guerra Mundial. Neste período, trabalhavam na Mina cerca de 5800 trabalhadores e cerca de 4800 dedicavam-se a explorar pequenos filões à superfície (denominada exploração do quilo).

Em Julho de 1944, um decreto do governo português obrigou ao fecho de todas as minas do volfrâmio no país. Após a 2ª Guerra Mundial, para compensar o baixo preço do volfrâmio, a Mina intensificou a exploração de cassiterite e em 1962 esta iniciou a produção de concentrados de cobre com a recuperação da calcopirite.

Em 1973 formou-se a empresa portuguesa “Beralt Tin & Wolfram S.A.”. Esta empresa procedeu à abertura, no sector da Barroca Grande, de um novo nível de extracção (nível 2), começando a sua exploração em 1982 e aumentando a produção de concentrados de volfrâmio de 25-30 toneladas para cerca de 200 toneladas mensais.

No início da década de noventa, a Mina passou por um período difícil, culminante no seu fecho de 1993 a Janeiro de 1995.

Em 1996 procedeu-se à transferência da lavaria do rio para uma nova lavaria, localizada na aldeia da Barroca Grande, ficando este processo concluído em 1998. Em Abril do mesmo ano a Mina abriu um novo nível de extracção, o nível 3.

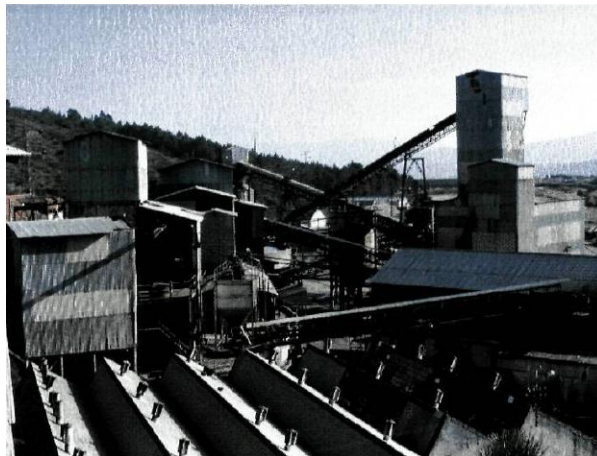


Figura 4 – Lavaria da Barroca Grande.

Em Maio de 2002, as reservas calculadas eram de 775.205 toneladas com teores de 0,336% de WO_3 . No entanto, adicionando as reservas estimadas os valores somavam 1.458.600 toneladas com teores médios de 0,296% de WO_3 , garantindo os níveis de produção de então (360.000 toneladas por ano) para mais mais quatro anos (Technical Report – Beralt Tin & Wolfram S.A., 2002).

Apesar de nos últimos anos o preço do volfrâmio projectar um cenário futuro favorável, a Mina tem vindo a operar, na maioria do tempo, com lucros relativamente baixos, e a simples ocorrência de avarias mecânicas ocasionais tem efeitos bastante negativos na produção mensal (Technical Report – Beralt Tin & Wolfram, 2002).

A produção anual registada em 2009 foi de 1.410 toneladas de WO_3 , 36 toneladas de Sn e 164 toneladas de Cu (dados fornecidos pela Beralt Tin & Wolfram S.A., 2011)

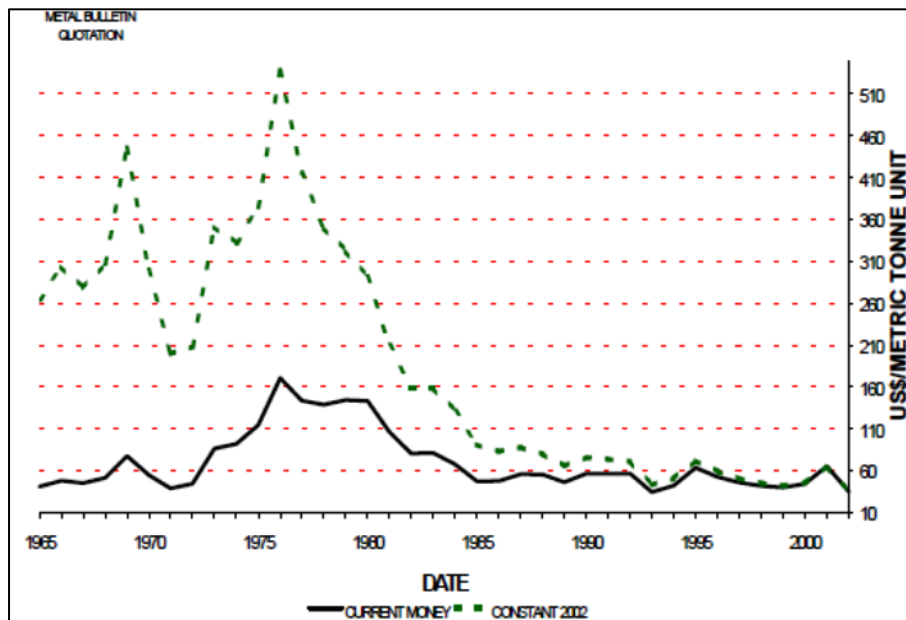


Figura 5 – Evolução do preço do volfrâmio desde 1965 até 2002.

2. Enquadramento geológico-estrutural

2.1. Geologia da Região Mineira

O depósito estano-volfrâmico da Panasqueira desenvolve-se em plena Zona Centro-Ibérica do Maciço Hespérico. As rochas predominantes neste distrito consistem numa faixa de rochas sedimentares dobradas, regionalmente metamorfizadas durante as fases compressivas iniciais da orogenia Hercínica, atingindo o grau de metamorfismo dos xistos verdes (clorite-sericite).

Segundo Thadeu (1951, 1977, 1979) esta faixa é composta por duas séries sedimentares distintas:

- 1- uma série metassedimentar bastante monótona, de fácies marinha de aspecto flyschóide, conhecida como os xistos das Beiras (Complexo Xisto-Grauváquico - CGX), alcançando uma espessura de vários milhares de metros, encontrando-se largamente distribuída no norte e centro de Portugal;
- 2- uma série superior de quartzitos e ardósias, de idade Ordovícica, de fina espessura.

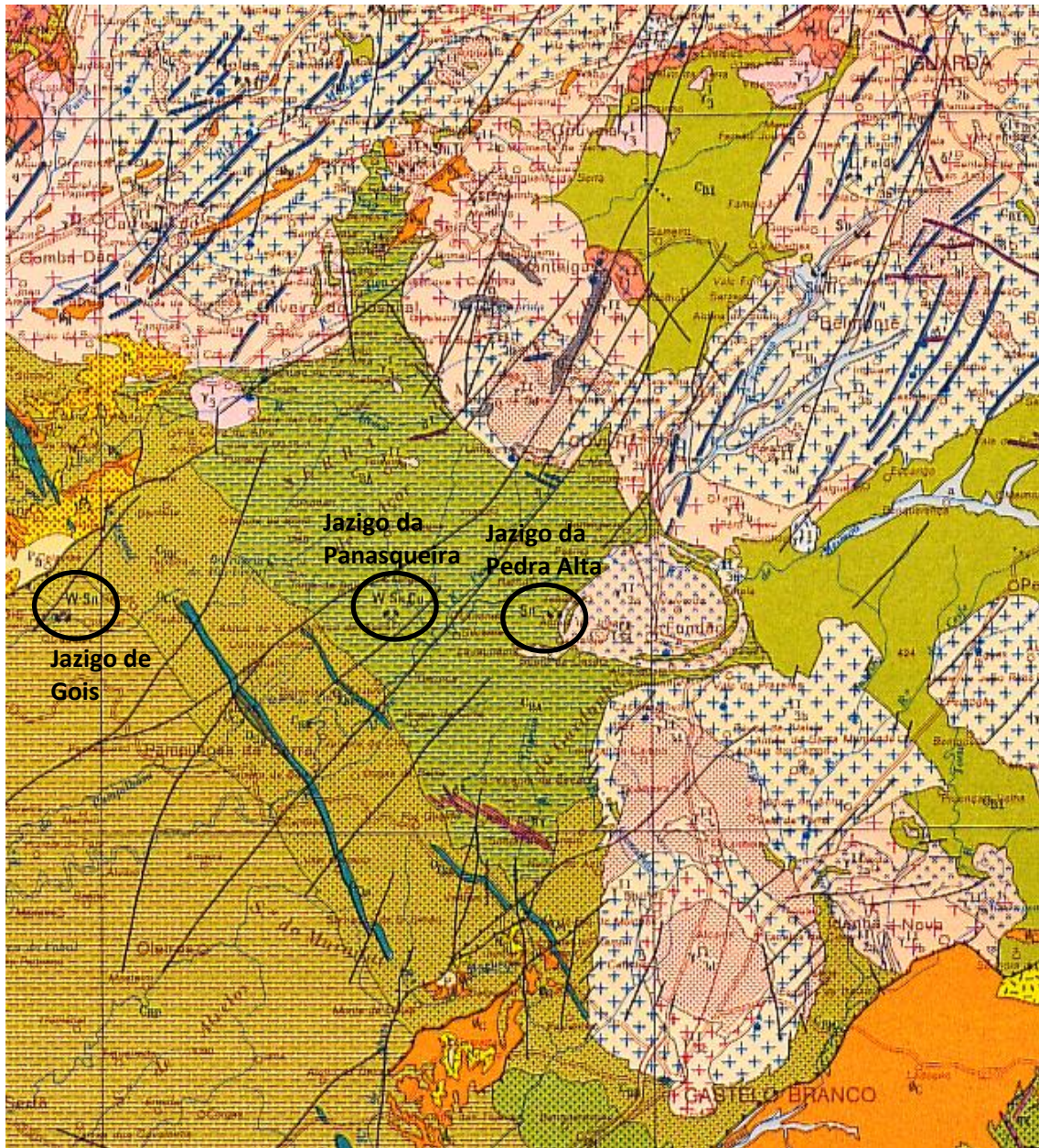
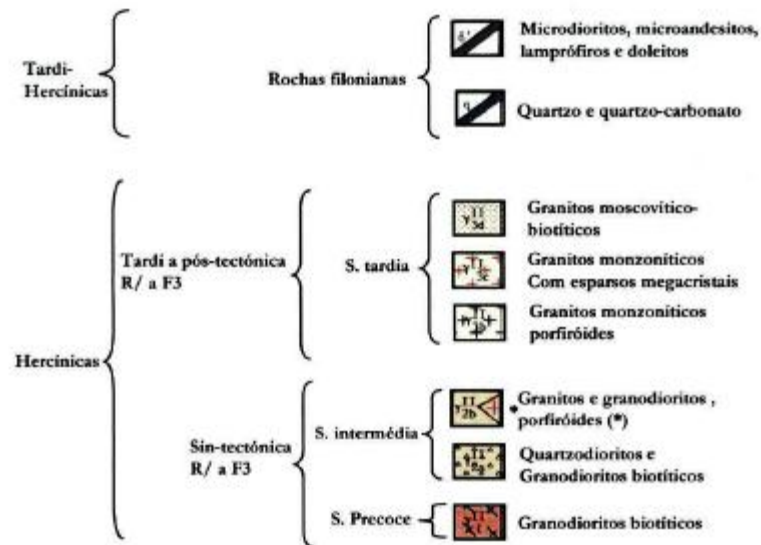


Figura 6 – Excerto da carta Geológica 1:500 000 dos SGP (1992). Enquadramento do jazigo da Panasqueira, assinalando o alinhamento E-W (Góis-Pedra Alta) referido em numerosos trabalhos clássicos (Neiva, 1944; Thadeu 1951)

Rochas magmáticas intrusivas



Estratigrafia

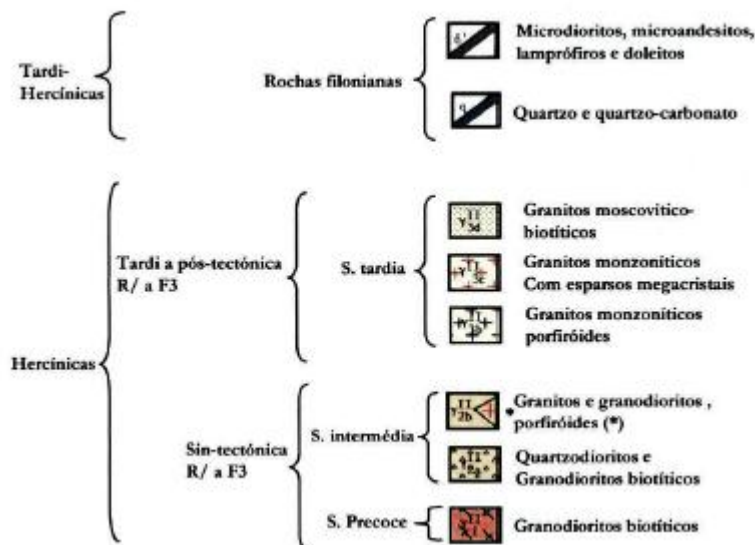


Figura 7 – Legenda da figura 6, SGP (Oliveira, Pereira, Ramalho, Antunes e Monteiro, 1992).

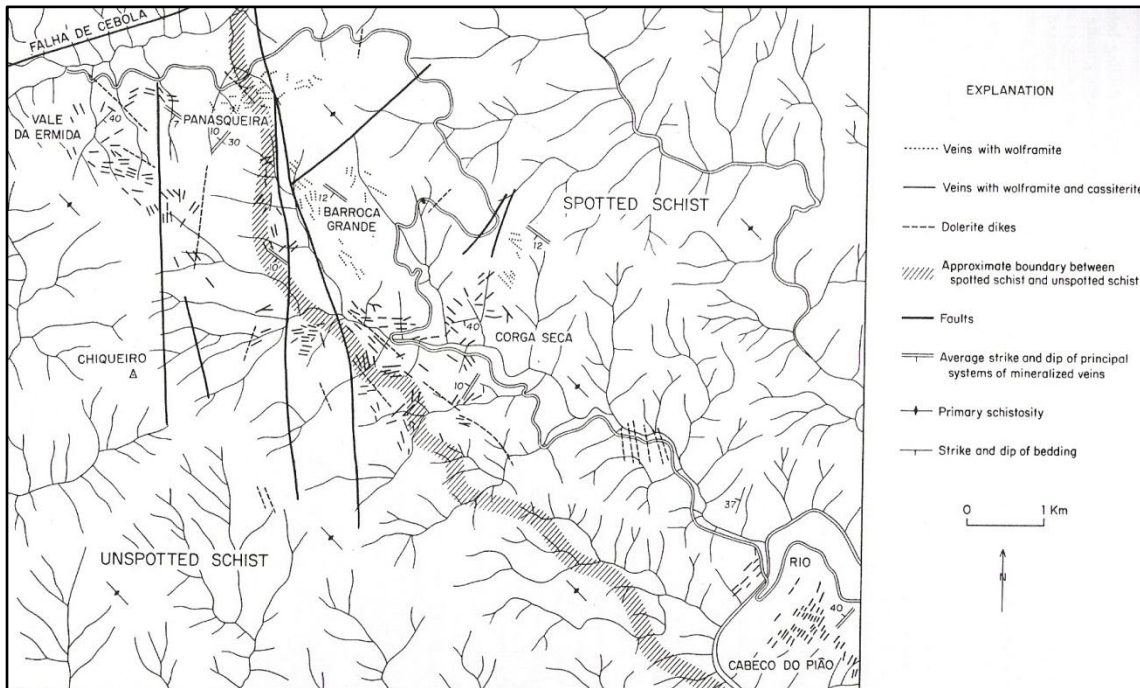


Figura 8 – Mapa geológico do Couto Mineiro da Panasqueira (Thadeu, 1951).

As rochas do CXG foram estudadas por vários autores, entre os quais, Thadeu (1951), Bloot e de Wolf (1953), Kelly e Rye (1979), entre outros. As litologias originais consistiam principalmente em argilitos siltítico-arenosos, grauvaques e arenitos de grão fino, não havendo nenhuma evidência para a ocorrência de evaporitos ou calcários, na sequência local (Kelly e Rye, 1979).

Durante o principal episódio de deformação regional (D1), estes sedimentos foram metamorfizados e deformados, preservando actualmente dobras isoclinais apertadas inclinando para NW-SE e xistosidade quase vertical.

Mineralogicamente, as rochas metapelíticas são essencialmente constituídas por quartzo, clorite, sericite, albite e, mais raramente, por carbonatos (Noronha *et al*, 1991). Bussink (1984) refere a existência de cerca de 0,17% de matéria orgânica em certas litologias destas séries. Nestas observam-se ainda numerosas lenticulas e veios de quartzo leitoso (denominado por “seixo bravo”), formado durante ou após o metamorfismo regional, estando muitas vezes cortados por filões mineralizados. O facto destas lenticulas se encontrarem normalmente alinhadas com a foliação vertical dos xistos, faz com que alguns autores proponham que estas se terão formado durante o metamorfismo regional.

O distrito da Panasqueira é rodeado a norte pelo batólito granítico da Serra da Estrela e, a este, pelo batólito do Fundão, ambos formados durante a orogenia Hercínica.

Os xistos e grauvaques, no Couto Mineiro da Panasqueira, são intruídos por rochas magmáticas, nomeadamente por diques doleríticos e aplíticos e pelo granito da Panasqueira, este último não aflorante mas denunciado pelos efeitos do metamorfismo de contacto.

De acordo com Thadeu (1951), a intrusão granítica consiste numa apófise de direcção NW-SE, mergulhando suavemente para SE, estando assim em concordância com a mancha aflorante de xistos mosqueados (figura 8).

Segundo Kelly e Rye (1979), o granito da Panasqueira consiste num granito porfírico de duas micas, com megacristais de feldspato potássico de tamanho superior a 1 cm. Este perde a textura porfírica em direcção ao seu ápex, convertendo-se num “greisen” equigranular de grão médio, principalmente constituído por quartzo e moscovite. Segundo Clark (1964), este granito possui ainda como minerais acessórios, zircão, monazite, apatite, ilmenite e pirite.

No entanto, Lourenço (2002), após estudo petrográfico detalhado da cúpula do “greisen”, concluiu não estar na presença de uma cúpula greisenizada de granito com biotite (Granito da Panasqueira), mas sim de um outro corpo granítico (granito da Barroca Grande). Este autor apresenta um quadro simplificado da sucessão de cristalização e posteriores alterações, como se observa na tabela 1.

Tabela 1 – Sucessão da cristalização do granito da Panasqueira da Barroca Grande e alterações tardi a pós-magmáticas (Lourenço, 2002).

Mineral \ Estádio	Magmático	Graisenização	Albitização
Quartzo	I	II	
Albite			II
Feldspato K	I		
Plagioclase			
Biotite	I		
Moscovite		II	
Hematite			

Embora o granito da Panasqueira/Barroca Grande não aflore, o “greisen” foi intersectado pelos trabalhos mineiros a cerca de 220 m de profundidade.

Kelly e Rye (1979) referem, confirmando a proposta de Thadeu (1951), que este granito se terá formado após as principais fases compressivas da orogenia Hercínica, devido à ausência de deformação neste. Já anteriormente Clark (1970 b), utilizando

métodos de datação absoluta de K/Ar em moscovites de granito fresco da Panasqueira, obtém uma “idade Hercínica” de cerca de 290 +/- 10 M.a.

Marignac (1971), contudo, elabora um estudo que contesta a ideia da instalação tardi-Hercínica deste granito, como será abordado posteriormente, neste capítulo.

Relativamente aos diques doleríticos, Thadeu (1951, 1971) descreve estes como verticais ou quase verticais, com uma espessura que varia entre os 0,5 e os 3 m, prolongando-se em comprimento por mais de 1 km. Texturalmente são micro-porfíricos e de grão fino, encontrando-se alterados no contacto com os filões mineralizados. Mineralogicamente são essencialmente constituídos por labradorite e piroxena anfibolitizada.

Thadeu originalmente interligou estes diques com os últimos estádios da orogenia Caledónica. No entanto, posteriormente atribuiu-lhes uma idade “tardi-Hercínica”, uma vez que estes não se encontram afectados pelo metamorfismo regional, não possuem deformação e revelam efeitos do metamorfismo de contacto devido à instalação do(s) granito(s) (Kelly e Rye, 1979).

Na região, são também conhecidos diques aplíticos, normalmente greisenizados e equivalentes ao granito da Panasqueira (Kelly e Rye, 1979). Estes autores datam estes diques da mesma altura em que se formaram os filões mineralizados. Esta datação está em concordância com a proposta por Thadeu (1951) que referiu que estes diques, tal como a própria cúpula granítica, se terão formado após os diques doleríticos, sendo contemporâneos dos veios mineralizados.

O depósito da Panasqueira deverá ter-se formado há cerca de 290 M.a., mas apenas uma pequena parte da sua história é conhecida. O distrito e os seus depósitos minerais faziam já parte do Maciço Hespérico, quando este se separou parcialmente (por rotação) da restante Europa, devido aos movimentos litosféricos durante a era Mesozóica. É, no entanto, difícil identificar evidências deste acontecimento nos afloramentos locais.

À parte dos fenómenos mais recentes, de que são exemplos os fenómenos de meteorização e erosão, os únicos eventos pós-Hercínicos que estão claramente registados nas rochas do distrito correspondem a movimentos tectónicos, de falhas formadas durante a orogenia Alpina e a mineralizações não económicas de carbonatos e sulfuretos ao longo dessas falhas. Infelizmente a maioria da área que rodeia as Minas da Panasqueira foi completamente erodida, pelo que, quaisquer unidades vulcânicas ou sedimentares que poderão ter-se formado, não se encontram

presentes, de modo a permitirem uma reconstituição dos movimentos verticais pós-mineralização (Kelly e Rye, 1979).

2.2. Geologia do Jazigo

O jazigo da Panasqueira é constituído por um extenso campo de filões quartzosos, notável pelas dimensões que atinge e pela diversidade da associação mineral que os preenche, bem como pela sua geometria e disposição espacial.

A instalação da mineralização foi precedida e, possivelmente, acompanhada por intensos fenómenos metassomáticos e de alteração hidrotermal, que atingiu tanto o granito (greisenização) como as rochas pelíticas (metamorfismo de contacto).

2.2.1. Metamorfismo de contacto

A intrusão do batólito Hercínico produziu uma extensa auréola de metamorfismo de contacto, constituída por xistos recristalizados e hidrotermalmente alterados, denominados de xistos mosqueados (figura 8).

Polya (1989) caracterizou quimicamente a alteração hidrotermal dos xistos mosqueados, referindo um enriquecimento de Rb, K, Cs, Li, W, Cu, Zn, Sn, S e P relativamente aos xistos não mosqueados. Este autor estabeleceu a seguinte associação paragenética para o metamorfismo regional expresso nas séries pelíticas: quartzo-albite-moscovite-clorite-paragonite. Esta alteração revela-se mais desenvolvida nos xistos que possuem um conteúdo maior argiloso, sendo que as “moscas” mineralogicamente consistem principalmente em biotite e clorite, com alguma cordierite e quiastolite (Kelly e Rye, 1979).

Thadeu (1951) diferenciou na área do couto mineiro, um sector constituído genericamente por xistos argilosos (zona ocidental) e outro sector constituído por xistos argilosos mosqueados (zona oriental), como se observa na figura 8. Kelly e Rye (1979) referem, no entanto, que a extensão da área dos xistos mosqueados é demasiado extensa para se atribuir à única cúpula granítica conhecida, pelo que este mosqueamento deverá, provavelmente, reflectir a presença de outras massas graníticas em profundidade.

Os xistos que ocorrem como xenólitos no interior da cúpula apresentam uma alteração bastante severa, com um mosqueamento intenso e conversão em corneanas. Estas são ricas em cordierite e plagioclase e pobres em polimorfos de Al_2SiO_5 (Clark, 1969, citado por Kelly e Rye, 1979).

A relação deste metamorfismo de contacto com as fases de deformação Hercínica é controversa. Por um lado, Marignac (1973), com base na análise estrutural do jazigo da Panasqueira, considera que o metamorfismo de contacto provocado pelo granito da Panasqueira, é anterior à deformação principal Hercínica, ao contrário da alteração hidrotermal (turmalinização que acompanha a mineralização de Sn-W-Cu). Por outro lado, Kelly (1977), Kelly e Rye (1979) e Polyá (1987), refutam esta hipótese, apoiando o modelo geral anteriormente apresentado por Thadeu (1951), no qual a auréola de metamorfismo de contacto é concordante com a apófise granítica não aflorante. Segundo estes autores, a forma alongada e elíptica das “moscas” de metamorfismo de contacto, paralelas à xistosidade, é devida a fenómenos de mimetismo da xistosidade, já existente durante a instalação granítica, e não devido à acomodação da deformação provocada pelo metamorfismo regional Hercínico, como defende Marignac.

A apoiar a hipótese de Thadeu existem os seguintes argumentos: presença de quartzo de tipo sacaróide existente unicamente nos filões “Seixo Bravo” (quartzo relacionado com metamorfismo regional) encaixados nos xistos mosqueados (Thadeu, 1951) e a ausência de qualquer vestígio de deformação regional, posterior ao granito da Panasqueira (Kelly, 1977).

2.2.2. Greisenização

A intrusão granítica do Couto Mineiro da Panasqueira, como já referido, não aflora na região, tendo sido encontrada em profundidade, pelos trabalhos mineiros.

A parte superior desta intrusão encontra-se profundamente greisenizada. Esta greisenização tem sido largamente estudada ao longo dos anos, por variados autores: Thadeu (1951), Bloot e de Wolf (1953), Clark (1964), Kelly e Rye (1979), Bussink (1984), Neiva (1987), Polyá (1989).

Baseado em estudos petrográficos e texturais de detalhe, Clark (1964) elaborou uma complexa sequência endomagmática/hidrotermal de fases, na evolução do granito greisenizado, concluindo que não existe nenhum lapso temporal na sequência. Este autor descreve uma zonação vertical da cúpula, na qual o granito porfíritico com megacristais de feldspato potássico evolui gradualmente para um greisen equigranular

rico em quartzo e moscovite, sendo estes minerais caracterizados como as principais fases endomagmáticas.

Kelly e Rye (1979), no entanto, com base em estudos de termometria, notaram a ausência de um intervalo de temperaturas na evolução da sequência endomagmática/hidrotermal do jazigo da Panasqueira, correspondendo a um significativo lapso temporal entre os estádios mais tardios da cristalização da cúpula e o começo da mineralização que constitui os filões.

O último estágio da sequência definida por Clark é caracterizado pela cristalização de minerais endomagmáticos e hidrotermais, incluindo alguns sulfuretos e outras fases minerais, que ocorrem também nos filões com uma paragénese semelhante.

Segundo Polya (1989), a greisenização do granito da Panasqueira é caracterizada por uma paragénese mineral dominada por quartzo, albite e moscovite, com alguma apatite, volframite, arsenopirite, cassiterite, calcopirite, pirite, pirrotite e esfalerite. Neiva (1987) refere ainda a presença de topázio, ilmenite, zircão e, muito raramente, feldspato potássico.

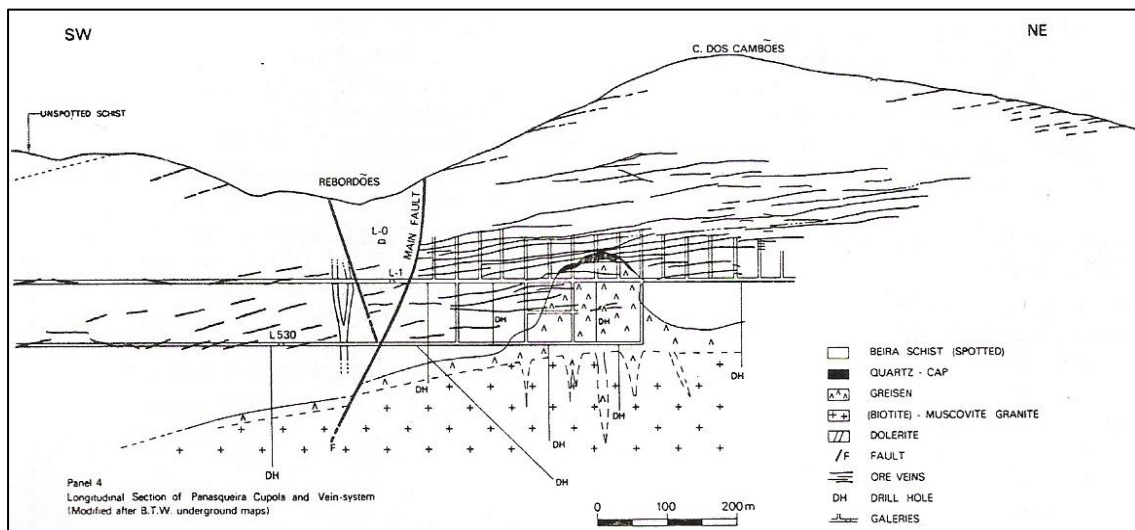


Figura 9 – Corte geológico segundo o painel P4 onde é possível observar a cúpula granítica da Panasqueira e a sua relação espacial com o sistema filoniano (Bussink, 1984).

2.2.3. Lentícula de quartzo (“Silica Cap”)

Kelly e Rye (1979) referem pela primeira vez a presença de uma lentícula de quartzo localizada no ápice da cúpula, com aproximadamente 14 m de espessura e uma extensão de 53 por 73 m (figura 10). Mineralogicamente esta é composta, quase na totalidade, por quartzo com pequenas quantidades de moscovite. Ocasionalmente ocorrem volframite, arsenopirite e outros sulfuretos.

Com base em observações macoscópicas, a lentícula de quartzo tem sido interpretada como uma massa de veios ou uma concentração apical de quartzo endomagmático. Kelly e Rye, no entanto, interpretam esta como sendo o resultado de preenchimento hidrotermal, sendo a sua mineralogia essencialmente idêntica à da margem dos filões mineralizados, pelo que deverá ser contemporânea destes. Ao contrário da abertura dos filões, a abertura da lentícula de quartzo não se formou inicialmente por dilatação de diaclases existentes nos xistos. Devido à sua localização apical, segundo estes autores, a abertura inicial deverá estar relacionada com a instalação da intrusão granítica.

Para a formação da lentícula de quartzo e dos filões mineralizados, Kelly e Rye (1979) propõem a seguinte sequência de acontecimentos: (1) contracção do corpo magmático, deixando espaço livre na zona apical; (2) fragmentação contínua dos xistos no topo câmara magmática, de modo a formar um arco estável; (3) solidificação da cúpula; (4) abertura das diaclases e do espaço onde se formou a lentícula de quartzo; (5) mineralização das diaclases e da lentícula de quartzo.

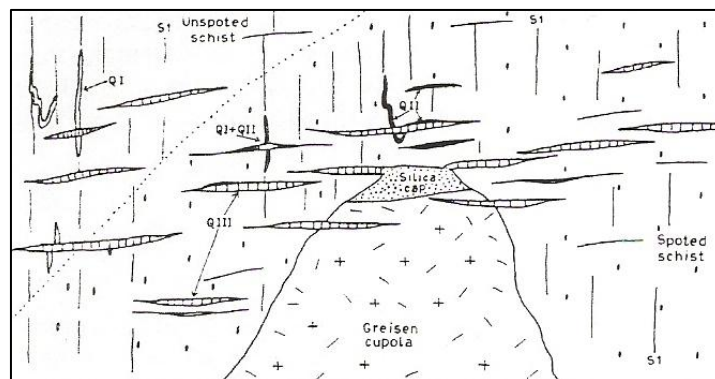


Figura 10 – Corte geológico onde é possível observar a cúpula do greisen e a “Silica Cap” no seu ápice (Noronha *et al.*, 1991).

2.2.4. Sistema de filões da Panasqueira

Caracterização morfológica – O depósito da Panasqueira consiste numa complexa rede tridimensional de mais de mil filões individuais, perfazendo cerca de 50% do volume da zona mineira reconhecida até ao momento (Polya, 1989).

A rede filoniana desenvolve-se, grosso modo, em forma de funil, inclinando ligeiramente para SE. Esta possui uma espessura de cerca de 100 a 200 m e uma extensão lateral de 6 km (Hebblethwaite, 1985, retirado de Polya, 1989).

Mineralogicamente, os filões são tipicamente pós-magmáticos e têm vindo a ser classificados na literatura como sendo de origem hidrotermal. No entanto, a sua paragénesese é complexa e os cristais que os preenchem atingem dimensões invulgarmente grandes. Estruturalmente, eles apresentam-se maioritariamente sub-horizontais, cortando a xistosidade das rochas encaixantes e, inclusivamente, a cúpula greisenizada (Kelly and Rye, 1979).

A análise da textura interna dos filões e das relações morfológicas entre eles indicam que a mineralização se formou por preenchimento de fracturas e não por processos de substituição. Estas fracturas corresponderão a diaclases sub-horizontais e sub-verticais, formadas nos metassedimentos enquadrantes, anteriormente aos filões (Kelly e Rye, 1979).

Tendo em conta a sua geometria e posicionamento espacial, bem como a constituição mineralógica dos seus preenchimentos, distinguem-se dois tipos de filões na rede filoniana da Panasqueira: os filões sub-horizontais e os filões sub-verticais.

Os filões sub-horizontais têm uma espessura que varia entre os 5 e 100 cm (média de 30 cm) (Noronha *et al*, 1991), observando-se um decréscimo irregular desta em direcção às margens (Polya, 1989). O seu conteúdo em volframite aumenta com o aumento da sua espessura (Smith, 1979, retirado de Noronha *et al*, 1991). Estes filões inclinam em média 8-10° SW, possuindo uma geometria em espiral (helicoidal) (Kelly e Rye, 1979).

Os filões sub-verticais, denominados “filões galo”, são menos numerosos que os sub-horizontais, sendo geralmente cortados por estes. A sua inclinação média é de 30° (Noronha *et al*, 1991). Estes filões encontram-se sobretudo na proximidade da cúpula greisenizada e parecem estar conectados com os filões sub-horizontais que se fundem com a lentícula de quartzo (sílica cap) (Kelly e Rye, 1979).

Falhas posteriores aos filões mineralizados, formadas provavelmente durante a orogenia Alpina, causaram alguns deslocamentos nestes (<1 m) (Battler, 1985, retirado de Polya, 1989). Estas falhas apresentam-se sub-verticais e geralmente hospedam mineralizações de sulfuretos e carbonatos (Noronha *et al*, 1991)



Figura 11 – Filão sub-horizontal do jazigo da Panasqueira. Fornecido pela Beralt Tin & Wolfram S.A.

Caracterização mineralógica – A mineralogia do depósito da Panasqueira tem vindo a ser descrita por vários autores. As primeiras contribuições surgiram de Thadeu (1951) e Bloot e de Wolf (1953). Mais tarde seguiram-se trabalhos como os de Clark (1964-1966), Orey (1967), Kelly and Rye (1979), Lourenço (2002), entre outros.

O quartzo predomina claramente, perfazendo mais de 90% da mineralização filoniana. No entanto, as percentagens dos minerais acessórios são pouco precisas, sendo os principais: vários sulfuretos, moscovite e carbonatos, perfazendo menos de 10% da mineralização filoniana (Kelly e Rye, 1979).

Lourenço (2002) identifica algumas regularidades no preenchimento dos filões, nomeadamente:

- presença de moscovite, volframite, cassiterite e arsenopirite, associadas a quartzo leitoso, exibindo posicionamento preferencial nas zonas dos encostos dos filões; os cristais crescem em massas com a excepção da cassiterite, que é sempre euédrica;
- na parte mais central observam-se sulfuretos, nomeadamente: calcopirite, arsenopirite, pirite e esfalerite, associados a quartzo relativamente hialino, com frequentes geodes que indiciam crescimento em espaço aberto;
- abundante marcassite, principalmente em pseudomorfoses ou recobrando a arsenopirite ou a siderite, quer em cristais euédricos, por vezes de grandes dimensões, quer em massa a preencher fracturas;

- por último, a recobrir todos os outros minerais, observam-se carbonatos (dolomite e calcite).

Clark (1964) identifica alguns minerais raros no jazigo da Panasqueira, como é o caso da magnetite, stibnite, bertrandite, scheelite, tungstite, hydrotungstite e escorodite. Kelly e Rye (1979) identificaram pela primeira vez a presença de clorite, referindo a sua abundância na sequência hipogénica tardia.



Figura 12 – Salbanda moscovítica e volframite na zona superior de um filão de quartzo leitoso sub-horizontal (Lourenço, 2002).



Figura 13 – Sulfuretos (pirite e calcopirite) a crescer na zona central de um filão de quartzo mineralizado (Lourenço, 2002).

Alteração hidrotermal associada – Alterações locais, na fronteira entre os filões mineralizados e os xistos, são bem conhecidas na literatura. Kelly e Rye (1979) identificam estas transformações locais no contacto dos filões com o granito, referindo que:

- quando os filões cortam os xistos, estes normalmente revelam uma banda de alteração escura (turmalinização), geralmente com alguns centímetros de espessura, podendo por vezes ultrapassar os 15 cm. Esta turmalinização é normalmente acompanhada por sericitização e/ou silicificação, para além de apatite e alguns sulfuretos.
- quando os filões cortam o granito alterado, eles estão normalmente rodeados por uma banda de alteração que pode alcançar mais do que 5 cm de espessura. Esta banda de alteração, embora mal caracterizada, parece ser definida pela ocorrência de moscovite e quartzo, diferindo contudo, da alteração que ocorre no restante granito greisenizado. Thadeu (1971) refere que a alteração provocada pelos filões tende a ser rica em apatite e alguns sulfuretos quando comparada com o restante “greisen”.

2.2.5. Sucessão mineral dos filões (sequência paragenética)

No que se refere à sucessão mineral dos filões mineralizados em W-Sn-Cu existem inúmeros trabalhos efectuados, mas todos são unânimes em constatar a grande dificuldade em estabelecer uma sucessão mineralógica coerente para todo o jazigo. Estas irregularidades poderão ser devidas a vários factos, dos quais se destacam a grande extensão do jazigo, diferentes modos de crescimento para a mesma geração mineral, bem como a possibilidade dos filões mineralizados poderem estar instalados em filões de quartzo preexistentes e a sobreposição espacial de duas mineralizações com paragénese bastante semelhantes (Lourenço, 2002).

Os trabalhos de Thadeu (1951) e Bloot e de Wolf (1953) foram pioneiros no estabelecimento de quadros paragenéticos. Ambos consideram a existência de três estádios principais: (1) estádio inicial com cassiterite, volframite, moscovite, apatite, arsenopirite, quartzo e turmalina; (2) estádio onde se depositaram essencialmente sulfuretos e (3) um estádio mais tardio no qual os carbonatos predominam.

Constatando as diferenças que existem entre os filões do sector da Barroca grande e os filões do sector do Vale da Ermida, Orey (1967) individualiza este segundo sector, propondo que a génese dos seus filões terá sido alimentada por um centro emanativo

distinto. Deste modo, este autor estabelece quadros paragenéticos de pormenor para os dois sectores. Sumariamente, a principal diferença assinalada entre os dois sectores, prende-se com a ocorrência de diferentes gerações de cassiterite. Para o sector da Barroca Grande, Orey identifica uma geração de cassiterite primária e uma geração secundária, resultante da alteração da estanita, ocorrendo sob a forma acicular, com inclusões de rútilo. Para o sector do Vale da Ermida, o mesmo autor considera a presença de duas gerações de cassiterite primária: uma cassiterite contemporânea da volframite, com inclusões de rútilo e outra sem rútilo, posterior mas sem resultar de alteração.

Kelly e Rye (1979), estabeleceram um quadro paragenético de pormenor para o jazigo da Panasqueira, assinalando quatro estádios principais para a mineralização de W-Sn-Cu:

- estágio dos óxidos-silicatos, que poderá ser dividido em dois sub-estádios: um mais precoce, constituído pela salbanda moscovítica associada a turmalina, topázio, arsenopirite e cassiterite e outro mais tardio, constituído por volframite, quartzo, moscovite e arsenopirite;
- estágio principal dos sulfuretos, constituído principalmente por arsenopirite, pirite, pirrotite, calcopirite, esfalerite, apatite e quartzo;
- estágio da alteração da pirrotite, caracterizado pela alteração da pirrotite e marcassite e pela presença de grandes quantidades de siderite;
- estágio dos carbonatos tardios, constituído principalmente por calcite e dolomite e sulfuretos tardios (pirite, esfalerite e calcopirite).

Polya (1989) apresenta uma sequência paragenética muito semelhante à de Kelly e Rye, mas para o primeiro autor a formação de moscovite antecede os restantes minerais, pelo que é individualizada num estágio. Deste modo, este autor apresenta cinco estádios principais de mineralização: (1) estágio da formação de moscovite; (2) estágio principal de formação de óxidos e silicatos; (3) estágio principal de formação dos sulfuretos; (4) estágio da alteração da pirrotite; (5) estágio tardio dos carbonatos.

Por último, Lourenço (2002) comparando os seus resultados com a sequência apresentada por Kelly e Rye (1979), propõe uma modificação a esta. A modificação prende-se essencialmente com a existência de uma sobreposição à mineralização de W-Sn-Cu, de uma mineralização de Sn-Cu, constituída por uma segunda geração de cassiterite intimamente associada a abundante turmalina com hábito acicular e a uma moscovite de pequenas dimensões. Associada a esta segunda mineralização, existe

superior a 1500 bar, as pressões que se fizeram sentir durante os cinco principais estádios de mineralização, deverão ter variado entre 250 e 500 bar.

2.3. Geologia económica

Os primeiros trabalhos sobre geologia económica no depósito da Panasqueira consistem em estudos que subdividem a região em zonas geográficas com diferente produção ou subdividem a região em blocos tectónicos, separados por falhas sub-verticais.

Thadeu (1951) melhorou estes esquemas ao identificar a orientação dos filões e o seu conteúdo mineral, em cada secção do depósito da Panasqueira. Os primeiros trabalhos neste âmbito descreviam as falhas sub-verticais como estruturas posteriores à mineralização, cuja única influência consistia na deslocação dos padrões de zonamento mineral ou na alteração da orientação de alguns filões. No entanto, algumas destas falhas são anteriores à mineralização e poderão ter desempenhado um papel activo, causando diferenças na orientação dos filões, frequência e mineralogia, de um bloco para bloco (Kelly e Rye, 1979).

Com base em dados morfológicos, mineralógicos e tectónicos, Thadeu (1951) individualizou sete zonas produtivas no Couto Mineiro da Panasqueira:

- sectores da Panasqueira e Barroca Grande;
- sectores da Corga Seca, Alvaroso, Veia Branca e Giestal;
- sector da Lomba da Cevada;
- sector de Rebordões e Seladinho;
- sector das Freiras e do Vale da Ermida;
- sector do Cabeço do Pião.

Contudo, nem todas as zonas onde ocorrem filões mineralizados, a sua exploração é economicamente viável. Tendo por base a descrição dos vários sectores efectuada por Thadeu, é possível, sob o ponto de vista das mineralizações, definir dois grupos principais (Lourenço, 2002):

- sector da Panasqueira, Barroca grande, Lomba da Cevada, Rebordões e Seladinho, Fonte das Lameiras e Cabeço do Pião, onde ocorre somente uma mineralização de volframite ou uma mineralização de volframite +/- cassiterite.

- sector de Vale da Ermida, Vale das Freitas, Corga Seca, Alvaroso, Veia Branca e Giestal, com uma mineralização constituída somente por cassiterite ou cassiterite e volframite, em que a segunda fase mineral é subsidiária.

Os sectores do Vale da Ermida e Panasqueira-oeste são particularmente ricos em sulfuretos, de tal modo que a exploração deste sector levou à recuperação da calcopirite (Pereira e Thadeu, 1971).

Blout e de Wolf (1953) referem ainda a importância da Falha Principal na divisão de vários sectores do Couto Mineiro da Panasqueira, com relevâncias económicas distintas. Segundo estes autores, a área mineralizada da Panasqueira é compartimentada por várias zonas de falha, das quais a Falha Principal é a mais importante. Esta falha N-S, anterior à mineralização, divide o depósito em duas partes distintas no que respeita a posição e ao arranjo dos filões: a área a este da Falha Principal e a área a oeste da Falha Principal.

Área a este da Falha Principal

Esta parte do depósito é de longe a mais produtiva, pois os seus filões encontram-se bastante enriquecidos em volframite com cassiterite em quantidade consideravelmente inferior.

Os filões desta área podem ser classificados em dois sistemas distintos, consoante a sua inclinação e espessura.

- 1) Sistema normal - São filões são paralelos, que mergulham cerca de 10-12° para SW. A sua espessura média é de 0,3 m e distam verticalmente entre si em 5-20 m. Pelo menos 10 a 12 desses filões são economicamente importantes.
- 2) Sistema “Galo” – Os filões pertencentes a este sistema consistem em corpos quartzosos, que mergulham cerca de 30-70° SE. A mineralização destes filões é semelhante à do sistema normal, mas apenas dois são economicamente importantes, atravessando a área na direcção NE-SW, denominando-se “Galo Nascente” e “Galo Poente”. Estes possuem uma espessura que varia entre os 0,5 e os 0,9 m e têm espaçamento irregular.

Área a oeste da Falha Principal

Nesta parte do depósito encontram-se filões com duas inclinações distintas, 7-8° SE e 7-8° SW. Apesar das posições diferentes, estes filões com inclinações distintas também diferem na sua mineralização.

- 1) Filões com inclinação para SW – Apresentam enriquecimento em volframite, disseminada irregularmente ao longo das paredes dos filões, podendo aparecer também, no centro dos mesmos. O quartzo é abundante, ocorrendo a cassiterite

ao longo das paredes dos filões juntamente com a calcopirite, esfalerite, arsenopirite e mica. Uma observação mais pormenorizada do arranjo mineral sugere que ambas as fases (cassiterite e volframite) estão invariavelmente acompanhadas pela mica ao longo das paredes dos filões.

- 2) Filões com inclinação SE, relativamente pobres em fases minerais, com significado económico.

2.4. Tectónica regional

As rochas do Couto Mineiro da Panasqueira, situadas em plena zona Centro-Ibérica (ZCI), foram afectadas por deformação polifásica, nomeadamente Hercínica e Alpina.

A existência de um cratão Pré-câmbrico na ZCI tem sido proposta com base na natureza das fácies observadas nas séries do Câmbrico, as quais possuem, sobretudo na região NE, indubitáveis características de plataforma. A partir do Câmbrico inferior, estabeleceu-se sobre este soco uma bacia, onde os sedimentos depositados chegaram a atingir espessuras consideráveis (alguns milhares de metros), dando origem ao CXG e séries afins.

Os dados bibliográficos existentes sobre a génese das bacias sedimentares e das margens continentais passivas conduziram, para a génese da Bacia Centro-Ibérica e sua posterior evolução para margem continental passiva, à seguinte sucessão de eventos (Ferreira *et al.*, 1987):

- a deposição dos sedimentos é contemporânea do estiramento do soco pré-câmbrico, acompanhado de subsidência da zona estirada, enquanto nos bordos não estirados se desenvolviam séries de plataforma, de espessura mais reduzida. Na fossa subsidente depositaram-se séries turbidíticas, passando lateralmente a séries detríticas da plataforma;
- o estiramento do soco terá sido acompanhado pela geração de falhas normais, à superfície, passando a cisalhamentos dúcteis em profundidade;
- no final do Câmbrico superior o sistema, até então em equilíbrio (estacionário), evoluiu, passando a regime transformante direito, gerando-se deste modo, as dobras e discordâncias sardas, preservadas nas séries do CXG e afins;
- durante todo o período Ordovícico, o fosso Centro-Ibérico estabilizou, conforme sugerido pelo carácter de plataforma e reduzida espessura da sedimentação neste período e relativa escassez de magmatismo;

- a época em que se inverteu o regime tectónico, com passagem de regime extensivo para regime compressivo, iniciando-se o fecho da bacia sedimentar subsidente, é apenas revelada pelos efeitos da primeira fase Hercínica que, dados estratigráficos e geocronológicos, datam do final do final do Devónico Médio. Os subseqüentes acontecimentos foram condicionados pela instalação de uma “flake” tectónica que produziu obducção para E (coordenadas actuais) da parte da crosta oceânica recém-formada juntamente com os bordos do oceano correspondente, e subducção da restante crosta oceânica sob a crosta continental, no mesmo sentido;
- posteriormente, o encurtamento crustal que nas primeiras fases de deformação, até à colisão continental dos bordos da bacia, originou dobras deitadas, produziu na terceira fase, dobras com plano axial vertical e zonas de cisalhamento dúctil associadas. Durante as fases de deformação Hercínicas as rochas do CXG adquiriram xistosidade com orientação para NW (Kelly e Rye, 1979).

Após o metamorfismo regional, toda a sequência lito-estratigráfica é cortada por um importante grupo de falhas sub-verticais de desligamento com direcção N-S a NE-SW, como se pode observar na figura 8. Estas terão sido reactivadas durante a orogenia Alpina, conforme sugerido pela brechificação geralmente cimentada por mineralizações não económicas de carbonatos, quartzo e alguns sulfuretos (Kelly e Rye, 1979).

As mineralizações de W-Sn nunca se estendem para além destas zonas de falha e, mesmo quando estas contêm mineralizações de quartzo e volframite, as mineralizações encontram-se brechificadas devido a movimentos tardios (Kelly e Rye, 1979).

No couro mineiro, estas falhas provocam apenas pequenos desvios nos filões, mas tal como foi referido por Thadeu (1951), o sistema filoniano da Panasqueira encontra-se estruturalmente limitado a norte, pela Falha da Cebola, uma vez que a NW desta não se conhecem afloramentos de filões mineralizados. Thadeu considera que o bloco a SE da falha abateu, tendo sido erodida a parte superior do bloco NW.

Wilson (1948) foi o primeiro a sugerir que algumas destas falhas são anteriores aos filões mineralizados, mesmo que a maioria delas tenham acomodado os principais movimentos muito mais tarde. Esta datação é difícil de provar, no entanto explica o facto de muitos filões terminarem no local das falhas, pelo que não se identificam sinais da continuação destes (Kelly e Rye, 1979)

As falhas de desligamento existentes no Couto Mineiro da Panasqueira têm sido fruto de alguns trabalhos científicos, pois existem ainda, algumas controvérsias relativamente à relação destas com as mineralizações.

Segundo Thadeu (1973) existem três sistemas de falhas principais de falhas, todas posteriores à mineralização de W-Sn-Cu: sistema NE-SW (Falha da Cebola e Falha 8E), sistema N-S (Falha Principal, Falha Poente e Falha do Vale das Freitas) e sistema ENE-WSW.

Já Blattler (1985), que efectuou um estudo sistemático sobre as falhas existentes no Couto Mineiro da Panasqueira, agrupou-as em quatro sistemas (Lourenço, 2002):

- Sistema N-S – caixa de falha com preenchimento argiloso, compreende as falhas: Vale das Freitas, Fonte das Lameiras, Y, 1-W, 3-W e Falha Principal;
- Sistema ENE-WSW – caixa de falha com preenchimento brechificado com cimento carbonatado;
- Sistema NE-SW – caixa de falha com preenchimento misto (material argiloso e brechóide), inclui a Falha 8E e Falha da Cebola;
- Sistema de falhas menores – constituído por um grupo de pequenas falhas, com diversos tipos de preenchimentos.

Este autor considerou que as falhas N-S são anteriores à génese do jazigo, pois apresentam “moscas” no preenchimento argiloso junto ao “greisen”, preservando a horizontalidade dos filões mineralizados no interior da caixa de falha. Por outro lado, as falhas ENE-WSW são consideradas como sendo descontinuidades reactivadas com a intrusão granítica, sendo a brecha cimentada por carbonatos contemporâneos dos carbonatos tardios do jazigo da Panasqueira. Estas terão mais tarde acomodado a deformação relacionada com a orogenia Alpina (Lourenço, 2002).

Polya (1988) aponta para um possível controlo das falhas de desligamento na génese da mineralização de W-Sn-Cu. Segundo este autor, a variação da composição das volframites, nomeadamente no que diz respeito ao seu teor de nióbio, poderá ser explicada através da incorporação deste elemento na estrutura cristalina devido à interacção com fluidos focalizados ao longo das falhas. Já Foxford *et al.* (2000) defendem que a mineralização não deverá estar relacionada com as zonas de falhas de desligamento, uma vez que o diaclasamento, no qual se instalaram os filões mineralizados, possui uma distribuição regular, sem explorar zonas de instabilidade estrutural (Lourenço, 2002).

Para além das zonas de falha, os metassedimentos no Couto Mineiro da Panasqueira, encontram-se fortemente fracturados. Segundo Kelly e Rye (1979), os vários conjuntos

de diaclases serão contemporâneos do percurso evolutivo pós-pico, pelo que são posteriores ao metamorfismo regional. A fracturação deverá ter começado na altura da instalação da intrusão granítica, devido ao controlo estrutural que a cúpula possui. No entanto, esta fracturação deve ter continuado após a cristalização do granito, pois a própria cúpula encontra-se afectada por esta. Estes autores referem ainda, que na proximidade das zonas de falha reactivadas, a fracturação poderá ter continuado até bem mais tarde. Mesmo assim, o período principal de fracturação deverá ter durado até às fases Hercínicas tardias, pois os filões instalados em diaclases, não se encontram sistematicamente fracturados.

Sumariamente, Kelly e Rye concluem que o principal período tectónico de diaclasamento é posterior ao metamorfismo regional, iniciando-se com a instalação da intrusão granítica, mantendo-se ao longo da sua solidificação e terminando antes da mineralização estano-volframítica. No entanto, como referido anteriormente, esta ordem de sequência de acontecimentos é discutível, pois não existe uma concordância entre autores, na bibliografia disponível sobre a Panasqueira.

2.5. Metalogénese

Relativamente à metalogénese do jazigo da Panasqueira, várias perspectivas têm sido abordadas, dando origem a modelos genéticos diferentes. Estes modelos diferem substancialmente em dois aspectos: a origem dos fluidos mineralizantes e os mecanismos de controlo da sub-horizontalidade e do preenchimento dos filões.

Clarke (1964) e Thadeu (1971) foram os primeiros autores a debruçarem-se sobre estas problemáticas. Ambos propuseram a intrusão granítica como geradora dos fluídos mineralizantes, sendo esta a única fonte dos metais que ocorrem nas mineralizações filonianas, nomeadamente dos que possuem importância económica (W-Sn-Cu). Clarke (1964) inclusivamente referiu que no depósito da Panasqueira existe uma perfeita continuidade da evolução da cristalização magmática e hidrotermal, aparentemente sem lapsos temporais. Esta hipótese foi refutada por Kelly e Rye (1979), como referido anteriormente.

Kelly e Rye (1979), a partir de estudos de inclusões fluídas e de isótopos estáveis de minerais do jazigo da Panasqueira, concluíram que os fluidos envolvidos na génese das mineralizações não terão sido de origem exclusivamente magmática, contendo uma forte contribuição de meteórico-derivada. No entanto, atribuem à cúpula um papel

estrutural, canalizador dos fluidos e, como tal, responsável pela distribuição espacial das mineralizações. Esta hipótese foi defendida mais tarde também por outros autores, nomeadamente Bussink (1984) e Lourenço (2002).

Lourenço (2002) refere ainda que os fluidos de origem magmática poderão ter sido responsáveis pelas mineralizações mais precoces (formação de turmalina e topázio). Contudo, as mineralizações mais tardias, como a de Sn-Cu, poderão estar ligadas não directamente aos fluidos magmáticos mas sim à lixiviação da cassiterite disseminada no granito, por fluidos exteriores, nomeadamente fluidos hidrotermais meteórico-derivados.

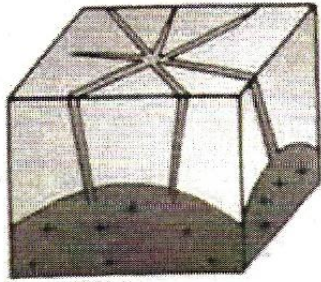
Relativamente à sub-horizontalidade dos filões e ao seu preenchimento, Kelly e Rye (1979) entendem que estes filões resultam do preenchimento de diaclases previamente formadas, evidenciando o facto de este preenchimento não mostrar sinais de reaberturas. Segundo estes autores, as evidências apontam para a ocorrência de um único evento de dilatação, no qual todo o sistema de diaclases foi aberto e preenchido, o que explica o facto de todos os filões do jazigo conterem a mesma sequência de precipitação mineral. Para Kelly e Rye a dilatação das diaclases é explicada unicamente devido à sobrepressão dos fluidos circulantes, pondo-se de parte a influência da tectónica ou da subsidência magmática.

Polya (1988 e 1989) e Polya *et al.* (2000), contudo, apoiam a hipótese metalogenética defendida por Clark (1964) e Thadeu (1971), concluindo nos seus estudos que a intrusão deverá ser a fonte dos metais presentes da mineralização filoniana (W, Sn, Zn, Cu e As), atribuindo ainda às principais falhas sub-verticais do couro Mineiro o papel de remobilização dos fluidos de origem magmática. Segundo este autor a cúpula granítica terá uma participação menor neste processo.

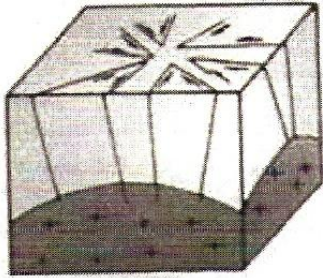
Também, Noronha *et al.* (1991) concordam com Polya (1988) no que diz respeito à importância do controlo tectónico na remobilização dos fluidos mineralizantes. Noronha *et al.* (1991) defendem inclusivamente, ao contrário de Kelly e Rye (1979), a reabertura sucessiva do preenchimento dos filões, das quais resultaram diferentes gerações de quartzo.

Relativamente à sub-horizontalidade dos filões da Panasqueira, Ribeiro e Pereira (1982), propõem um modelo que sugere que as diaclases produzidas por fracturação, foram reabertas após a instalação e abatimento de um corpo granítico intrusivo pós-tectónico, aquando da sua solidificação e contracção.

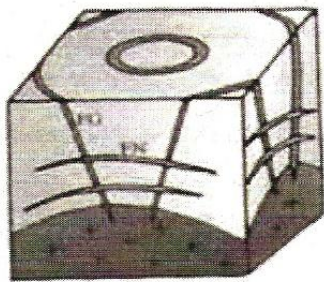
Este processo encontra-se explicado em pormenor no esquema da figura 15.



1 – Durante a fase de ascensão do maciço intrusivo, devido à pressão ascendente do magma e à dilatação que provoca, ocorre fracturação hidráulica e abertura de uma rede filoniano radial em torno do centro eruptivo.



2 – Quando se atinge o equilíbrio entre a pressão do magma ascendente e a resistência oferecida à intrusão pelas paredes da rocha encaixante, o abaixamento da pressão dos fluidos obriga a uma cedência, não por tracção mas por cisalhamento, gerando-se cisalhamentos conjugados.



3 – Quando o maciço entra em fase de solidificação dá-se a contracção da zona apical. Se a pressão dos fluidos ainda for superior à soma da tensão vertical e da resistência à tracção, geram-se por fracturação hidráulica, fendas de tracção sub-horizontais e, simultaneamente, filões concêntricos em cisalhamentos abertos.

Figura 15 – Modelo de instalação de um granito pós-tectónico (Ribeiro e Pereira, 1982)

Capítulo II - Método de Prospecção Magnetotelúrica (MT)

O método magneto-telúrico (MT) é um método passivo de exploração que utiliza uma banda de espectro natural de variações geomagnéticas, como fonte de indução electromagnética da Terra. Como tal, este método difere dos métodos geoelectricos, nos quais é injectada uma corrente eléctrica no solo.

Este método envolve a medição, na superfície da Terra, de flutuações nos campos naturais eléctrico (E) e magnético (B), em duas direcções ortogonais para o campo eléctrico e duas ou três direcções ortogonais para o campo magnético, como meio de predeterminar a estrutura condutiva desta, a profundidades que variam entre dezenas de metro e centenas de quilómetros.

A base deste método reside no facto de a profundidade de penetração dos campos electromagnéticos na Terra, dependerem do período do campo electromagnético e da condutividade dos materiais terrestres. A relação entre a profundidade de penetração $p(T)$, o período (T) e a condutividade do meio (se uniforme) é:

$$p(T) = (T/\pi\mu\sigma)^{1/2}$$

onde μ é a permeabilidade magnética e σ é a condutividade média.

Em estudos práticos a μ é atribuído o valor do vazio ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$) e a equação anterior pode ser aproximada a:

$$p(T) \approx \sqrt{T\rho a}$$

onde ρa é a resistividade aparente ou a resistividade média de um meio equivalente a um meio uniforme.

A profundidade atingida por um método electromagnético passivo é ditada pela condutividade média dos materiais rochosos e pela frequência do campo electromagnético, sendo que, os campos electromagnéticos que são naturalmente induzidos no subsolo e que são explorados em MT, têm períodos que vão desde os 10^{-3} a 10^5 s. Por interpretação da última equação podemos perceber que a profundidade de penetração ($p(T)$) aumenta com o aumento do período (T), ou seja, quanto menores as frequências medidas, maiores são as profundidades de penetração que se alcançam. Em meios electromagnéticos activos (fonte controlada) as profundidades atingidas estão sempre limitadas ao tamanho da fonte disponível e às configurações da fonte/receptor.

Embora sejam os processos magnéticos e hidrodinâmicos do núcleo externo terrestre, os grandes responsáveis pela geração do campo magnético terrestre, o método MT explora as flutuações de pequena amplitude, de origem externa. O espectro de potência (Figura 16) dessas flutuações decresce no intervalo de frequências de 0,5-5 Hz, atingindo um mínimo na frequência de 1 Hz. Este intervalo de sinais de baixa amplitude, conhecido como “dead-band”, deve-se à origem dos mecanismos de

indução: um acima de 1 Hz e outro abaixo dos 1 Hz. A “dead-band” manifesta-se, frequentemente, numa redução da qualidade dos dados, visível nas curvas de MT (Simpson e Bahr, 2005).

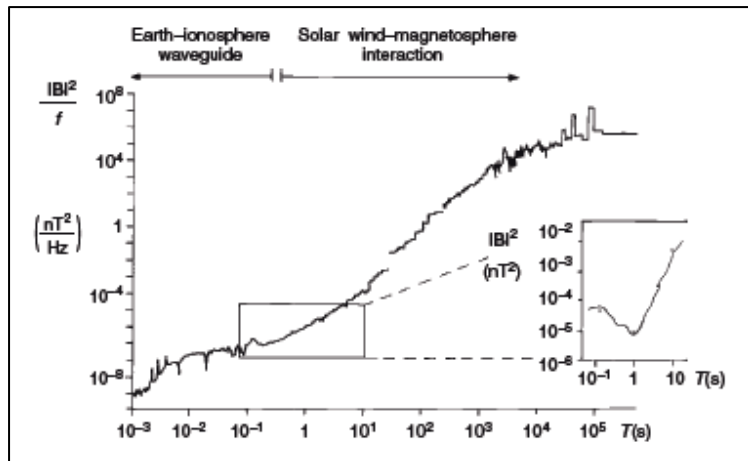


Figura 16 – Espectro de potência ilustrando as características das variações magnéticas naturais. Os sinais correspondentes a períodos pequenos são gerados pela interação Terra-Ionosfera. Sinais correspondentes a períodos longos são gerados pela interação ventos solares-magnetosfera. Detalhe acerca da redução de potência da “dead-band” (Simpson e Bahr, 2005).

Os campos electromagnéticos com frequências superiores a 1 Hz (períodos abaixo de 1 s) têm origens meteorológicas, tais como descargas eléctricas, englobando um intervalo grande de frequências, sendo estes sinais conhecidos como “esféricos”. No entanto, as descargas eléctricas locais podem saturar os amplificadores e, não são estas mas sim os esféricos das regiões equatoriais (altamente perturbadas) que se propagam pelo planeta, nomeadamente pela ionosfera e superfície terrestre, que são de maior importância. As interações entre o vento solar, magnetosfera e ionosfera terrestre, geram flutuações electromagnéticas com frequências inferiores a 1 Hz (períodos superiores a 1 s). Variações na densidade e velocidade do vento solar, produzem rápidas distorções e variações na magnetosfera terrestre. Estas distorções geram pequenas variações sinusoidais do campo geomagnético, denominadas de pulsações. Por exemplo, o aumento da pressão do vento solar causa rápida compressão da magnetosfera e, como tal, compactação das linhas de campo, levando a um aumento na componente horizontal do campo geomagnético.

As interações indutivas e hidromagnéticas entre a magnetosfera e a ionosfera, modificam de forma complexa estas flutuações de campo, antes destas alcançarem a superfície terrestre.

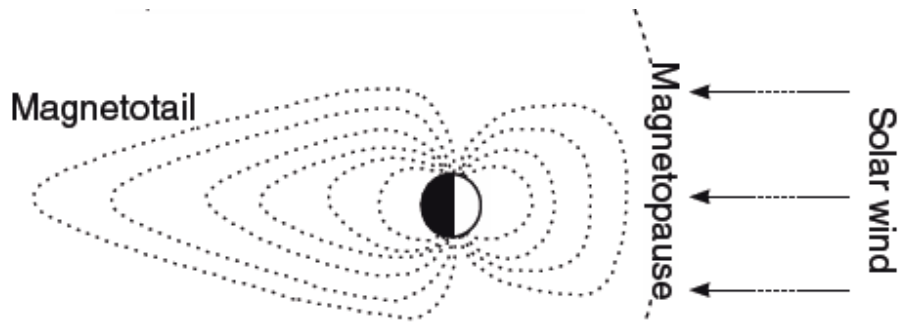


Figura 17 – Deformação das linhas do campo magnético da magnetosfera terrestre causada pela interação com os ventos solares (Simpson e Bahr, 2005).

1. Casos em que os estudos electromagnéticos são úteis

Determinar a resistividade eléctrica de rochas só se torna útil quando esta pode ser relacionada com outros parâmetros ou processos físicos. São factores cruciais na determinação da resistividade eléctrica em rochas e minerais, os seguintes factores: temperatura, pressão, estado físico e estado químico, porosidade, permeabilidade, conteúdo em água e a frequência a que essas medições são efectuadas,

A capacidade de transmissão de corrente eléctrica por materiais é chamada de condutividade. Esta ocorre em rochas e minerais por três tipos de mecanismos eléctricos diferentes: condução electrónica, semi-condução e condução electrolítica.

Condução electrónica ocorre em minerais metálicos (por ex. magnetite, hematite) que contêm electrões livres. Este tipo de condução é mais significativo no núcleo terrestre. A condução em grafite é de particular interesse em estudos de electromagnéticos (EM), pois os cristais de grafite são bons condutores electrónicos, devido à grande disponibilidade de electrões livres. A condutividade da grafite amorfa que ocorre na crosta terrestre, é mais baixa do que a condutividade de minerais metálicos, mas mais alta do que a condutividade de semicondutores naturais ou electrolíticos.

A semi-condução ocorre em condutores pobres que contêm poucas cargas livres, pois apenas uma pequena porção dos electrões presentes contribuem para a condução de corrente eléctrica. Um aumento de condutividade pode ser consequência da inclusão de electrões vindos de algumas impurezas e por um aumento de temperatura. Semi-condução é esperada em minerais do manto terrestre, tais como a olivina.

A condução electrolítica ocorre em soluções que contêm iões livres. Água salina é um electrolito de particular relevância em estudos EM, sendo que os iões livres (por ex. Na^+ , Cl^-) são derivados de dissolução de sais. Apenas a água livre (isto é, água não

Paula Póvoa

quimicamente ligada) tem um efeito significativo no aumento da condutividade. Em regiões tectónicamente activas, qualquer melt parcial derivado do aumento de temperatura, descompressão adiabática ou ascensão de material astenosférico, pode actuar como um condutor electrolítico.

Os minerais condutores que ocorrem na crosta, com a necessária abundância e geometria para afectarem a resistividade eléctrica são: grafite, sulfuretos (ex. pirite e pirrotite), magnetite, hematite. No entanto, a porosidade e permeabilidade variam substancialmente com o tipo de rocha e sua génese, sendo que variações nestes parâmetros afectam substancialmente a condutividade eléctrica.

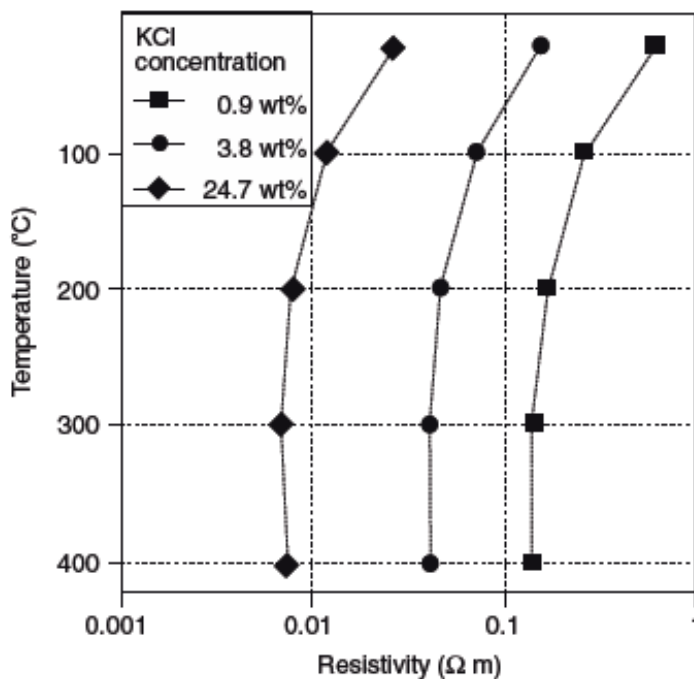


Figura 18 – Variação da resistividade consoante a concentração de KCl em solução aquosa (Simpson e Bahr, 2005).

As rochas sedimentares têm, em geral, um conteúdo elevado em fluídos intersticiais e são geralmente mais porosas que as rochas ígneas e metamórficas, a menos que estas últimas se encontrem extensivamente fracturadas. Rochas sedimentares inconsolidadas podem ter porosidades de 40%, enquanto que as mais velhas, e logo mais densas e profundas, têm tipicamente porosidades de 5% e logo, valores de resistividade mais elevados (Simpson e Bahr, 2005).

Nas tabelas 2, 3, 4 e 5 podemos observar valores de resistividade para alguns minerais, e rochas e águas (Telford *et al*, 1990).

Tabela 2 – Resistividades de minerais e águas (Telford *et al*, 1990).

Magnetotelúrica aplicada à prospecção mineira

Mineral	Formula	Resistivity (Ωm)	
		Range	Average
Bismuthinite	Bi_2S_3	18-570	
Covellite	CuS	$3 \times 10^{-7} - 8 \times 10^{-5}$	2×10^{-5}
Chalcocite	Cu_2S	$3 \times 10^{-5} - 0.6$	10^{-4}
Chalcopyrite	$CuFeS_2$	$1.2 \times 10^{-5} - 0.3$	4×10^{-3}
Bornite	Cu_5FeS_4	$2.5 \times 10^{-5} - 0.5$	3×10^{-3}
Pyrite	FeS_2	$2.9 \times 10^{-5} - 1.5$	3×10^{-1}
Pyrrhotite	$Fe_{n-m}S_m$	$6.5 \times 10^{-6} - 5 \times 10^{-2}$	10^{-4}
Cinnabar	HgS		2×10^7
Molybdenite	MoS_2	$10^{-3} - 10^6$	10
Galena	PbS	$3 \times 10^{-5} - 3 \times 10^2$	2×10^{-3}
Millerite	NiS		3×10^{-7}
Stannite	Cu_2FeSnS_2	$10^{-3} - 6 \times 10^3$	
Stibnite	Sb_2S_3	$10^5 - 10^{12}$	5×10^6
Sphalerite	ZnS	$1.5 - 10^7$	10^2
Cobaltite	$CoAsS$	$3.5 \times 10^{-4} - 10^{-1}$	
Arsenopyrite	$FeAsS$	$2 \times 10^{-5} - 15$	10^{-3}
Niccolite	$NiAs$	$10^{-7} - 2 \times 10^{-3}$	2×10^{-5}
Bauxite	$Al_2O_3 \cdot nH_2O$	$2 \times 10^2 - 6 \times 10^3$	
Cuprite	Cu_2O	$10^{-3} - 300$	30
Chromite	$FeCr_2O_4$	$1 - 10^6$	
Specularite	Fe_2O_3		6×10^{-3}
Hematite	Fe_2O_3	$3.5 \times 10^{-3} - 10^7$	
Limonite	$2Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$	$10^3 - 10^7$	
Magnetite	Fe_3O_4	$5 \times 10^{-5} - 5.7 \times 10^3$	
Ilmenite	$FeTiO_3$	$10^{-3} - 50$	
Wolframite	Fe, Mn, WO_4	$10 - 10^5$	
Pyrolusite	MnO_2	$5 \times 10^{-3} - 10$	
Quartz	SiO_2	$4 \times 10^{10} - 2 \times 10^{14}$	
Cassiterite	SnO_2	$4 \times 10^{-4} - 10^4$	0.2
Rutile	TiO_2	30-1000	500
Uraninite (pitchblende)	UO_2	1-200	
Anhydrite	$CaSO_4$		10^9
Calcite	$CaCO_3$		2×10^{12}
Fluorite	CaF_2		8×10^{13}
Siderite	$Fe_2(CO_3)_3$		70
Rock salt	$NaCl$	$30 - 10^{13}$	
Sylvite	KCl	$10^{11} - 10^{12}$	
Diamond	C	$10 - 10^{14}$	
Serpentine		$2 \times 10^2 - 3 \times 10^3$	
Hornblende		$2 \times 10^2 - 10^6$	
Mica		$9 \times 10^2 - 10^{14}$	
Biotite		$2 \times 10^2 - 10^6$	
Bitum. coal		$0.6 - 10^5$	
Anthracite		$10^{-3} - 2 \times 10^5$	
Lignite		9-200	
Fire clay			30
Meteoric waters		$30 - 10^3$	
Surface waters (ign. rocks)		$0.1 - 3 \times 10^3$	
Surface waters (sediments)		10-100	
Soil waters			100
Natural waters (ign. rocks)		0.5-150	9
Natural waters (sediments)		1-100	3
Sea water			0.2
Saline waters, 3%			0.15
Saline waters, 20%			0.05

Tabela 3 – Resistividades de minérios (Telford *et al*, 1990).

Ore	Other minerals	Gangue	ρ (Ωm)
Pyrite			
18%	2% (chalco)	80%	300
60%	5% (ZnS) + 15%	20%	0.9
95%	5% (ZnS)		1.0
Pyrrhotite			
41%		59%	2.2×10^{-4}
79%		21%	1.4×10^{-5}
95%		5%	1.4×10^{-5}
Sb ₂ S ₃ in quartz			$4 \times 10^3 - 3 \times 10^7$
FeAsS 60%	FeS 20%	20% SiO ₂	0.39
FeAsS			$10^{-4} - 10^{-2}$
Cu ₂ FeS ₄			3×10^{-3}
Cu ₂ FeS ₄ 40%		60% SiO ₂	7×10^{-2}
Fe, Mn, WO ₄	CoAsS		$10^3 - 10^7$
PbS, near massive			0.8
Fe ₂ O ₃			0.1 - 300
Fe ₂ O ₃ , massive			2.5×10^3
Iron			
Fe ₃ O ₄ 60%			45
75% brown iron oxide		25%	$2 \times 10^4 - 8 \times 10^5$
Fe ₃ O ₄			$5 \times 10^3 - 8 \times 10^3$
Zinc			
30%	5% PbS, 15% FeS	50%	0.75
80%	10% PbS, 10% FeS		1.7×10^3
90%	5% PbS	5%	130
Graphitic slate			0.13
Graphite, massive			$10^{-4} - 5 \times 10^{-3}$
MoS ₂			$2 \times 10^2 - 4 \times 10^3$
MnO ₂ colloidal ore			1.6
Cu ₂ S			3×10^{-2}
CuFeS ₂			$10^{-4} - 1$
CuFeS ₂ 90%	2% FeS	8% SiO ₂	0.65
FeCr ₂ O ₄			10^3

Tabela 4 – Variação da resistividade das rochas com a variação do seu conteúdo em água (Telford *et al*, 1990).

Rock	% H ₂ O	ρ (Ωm)
Siltstone	0.54	1.5×10^4
Siltstone	0.38	5.6×10^8
Coarse grain SS	0.39	9.6×10^5
Coarse grain SS	0.18	10^8
Medium grain SS	1.0	4.2×10^3
Medium grain SS	0.1	1.4×10^8
Graywacke SS	1.16	4.7×10^3
Graywacke SS	0.45	5.8×10^4
Arkosic SS	1.0	1.4×10^3
Organic limestone	11	0.6×10^3
Dolomite	1.3	6×10^3
Dolomite	0.96	8×10^3
Peridotite	0.1	3×10^3
Peridotite	0	1.8×10^7
Pyrophyllite	0.76	6×10^6
Pyrophyllite	0	10^{11}
Granite	0.31	4.4×10^3
Granite	0.19	1.8×10^6
Granite	0	10^{10}
Diorite	0.02	5.8×10^5
Diorite	0	6×10^6
Basalt	0.95	4×10^4
Basalt	0	1.3×10^8
Olivine-pyrox.	0.028	2×10^4
Olivine-pyrox.	0	5.6×10^7

Tabela 5 – Resistividades de rochas (Telford *et al*, 1990).

Rock type	Resistivity range (Ωm)
Granite porphyry	4.5×10^3 (wet) – 1.3×10^6 (dry)
Feldspar porphyry	4×10^3 (wet)
Syenite	$10^2 - 10^6$
Diorite porphyry	1.9×10^3 (wet) – 2.8×10^4 (dry)
Porphyrite	$10 - 5 \times 10^4$ (wet) – 3.3×10^3 (dry)
Carbonatized porphyry	2.5×10^3 (wet) – 6×10^4 (dry)
Quartz diorite	$2 \times 10^4 - 2 \times 10^6$ (wet) $- 1.8 \times 10^5$ (dry)
Porphyry (various)	$60 - 10^4$
Dacite	2×10^4 (wet)
Andesite	4.5×10^4 (wet) – 1.7×10^2 (dry)
Diabase (various)	$20 - 5 \times 10^7$
Lavas	$10^2 - 5 \times 10^4$
Gabbro	$10^3 - 10^6$
Basalt	$10 - 1.3 \times 10^7$ (dry)
Olivine norite	$10^3 - 6 \times 10^4$ (wet)
Peridotite	3×10^3 (wet) – 6.5×10^3 (dry)
Hornfels	8×10^3 (wet) – 6×10^7 (dry)
Schists (calcareous and mica)	$20 - 10^4$
Tuffs	2×10^3 (wet) – 10^5 (dry)
Graphite schist	$10 - 10^2$
Slates (various)	$6 \times 10^2 - 4 \times 10^7$
Gneiss (various)	6.8×10^4 (wet) – 3×10^6 (dry)
Marble	$10^2 - 2.5 \times 10^8$ (dry)
Skarn	2.5×10^2 (wet) – 2.5×10^8 (dry)
Quartzites (various)	$10 - 2 \times 10^8$
Consolidated shales	$20 - 2 \times 10^3$
Argillites	$10 - 8 \times 10^2$
Conglomerates	$2 \times 10^3 - 10^4$
Sandstones	$1 - 6.4 \times 10^8$
Limestones	$50 - 10^7$
Dolomite	$3.5 \times 10^2 - 5 \times 10^3$
Unconsolidated wet clay	20
Marls	3 – 70
Clays	1 – 100
Oil sands	4 – 800

2. Conceitos teóricos básicos de MT

A fim de se reflectir sobre o fenómeno de indução electromagnética na Terra, algumas simplificações são aplicáveis. Deste modo, os pressupostos do método MT são (Simpson e Bahr, 2005):

- As equações electromagnéticas gerais de Maxwell são válidas;
- A Terra não gera energia electromagnética, apenas a absorve ou a dissipa;
- Todos os campos podem ser tratados como conservativos quando longe das suas fontes;
- A fonte electromagnética natural utilizada, sendo gerada por sistemas de correntes de grande escala na ionosfera, é relativamente afastada da superfície terrestre, podendo ser tratada como uniforme. Esta incide na superfície terrestre quase verticalmente, como ondas electromagnéticas planas e polarizadas. Este pressuposto pode não ser verdadeiro para as regiões polares e equatoriais;
- A acumulação de cargas livres não é esperada num modelo de Terra em camadas. Num modelo de Terra multi-dimensional, cargas podem ser acumuladas ao longo de descontinuidades. Este processo origina um fenómeno não indutivo conhecido como static shift (deslocamento estático);
- As cargas são conservadas e a Terra comporta-se como um condutor, obedecendo a lei de Ohm:

$$j = \sigma E$$

onde j é a densidade de corrente total (em Am^{-2}), σ é a condutividade do meio (em Sm^{-1}) e E é o campo eléctrico (em Vm^{-1}).

- O deslocamento do campo eléctrico é quasi-estático para períodos MT, como tal, variações temporais do deslocamento de correntes (que surgem devido a efeitos de polarização) são negligenciáveis quando comparados com as variações temporais de correntes condutivas, que promovem o tratamento da indução electromagnética na Terra como um processo de difusão;
- Qualquer variação na permitividade eléctrica e permeabilidade magnética das rochas é negligenciável, comparado com variações de condutividade em rocha maciça.

2.1. Invariância temporal

No âmbito do método MT, podemos assumir que a latitudes médias (longe dos complicados sistemas de correntes gerados nas zonas equatoriais e polares), estes sistemas na ionosfera são uniformes, horizontais e de larga escala, formam normalmente ondas planas que incidem na superfície da Terra condutiva. Uma onda plana propaga-se com direcção normal a um plano, no qual os campos são constantes. Este pressuposto de onda plana é fundamental na técnica MT porque implica uma invariância temporal da fonte. Como consequência desta invariância temporal, o tensor de impedâncias, calculado a partir dos campos ortogonais, eléctrico e magnético, numa dada estação deverá ser similar, independentemente de quando estes campos foram medidos, originando modelos de condutividade/resistividade da Terra que não se alteram com o tempo. No entanto, dados adquiridos durante a noite são geralmente mais livres de ruído dos que são adquiridos durante o dia (Simpson e Bahr, 2005).

Segundo a lei de Faraday, as variações temporais no campo magnético induzem flutuações no correspondente campo eléctrico, em circuito fechado e com os seus eixos orientados na direcção do campo induzido.

A lei de Ampere diz-nos que qualquer circuito fechado de corrente eléctrica vai ter associado um campo magnético de magnitude proporcional ao fluxo de corrente total.

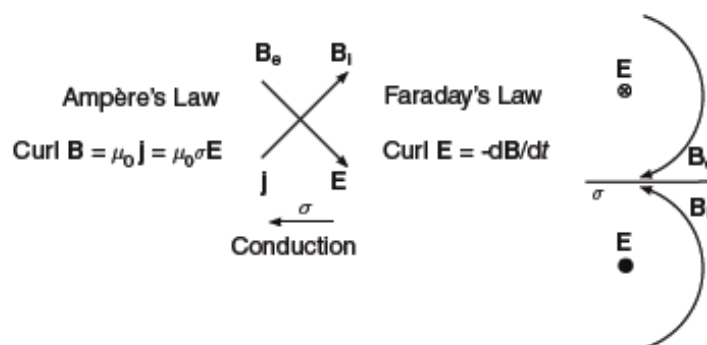


Figura 19 – Campo magnético externo variável com o tempo, B_e , que de acordo com a lei de Faraday induz um campo eléctrico E , o qual induz um campo magnético interno secundário B_i , de acordo com a lei de Ampere (Simpson e Bahr, 2005).

2.2. Conceito de função de transferência

Um modelo geoelectrico simples é o que corresponde a um semi-espaço homogéneo, compreendido entre um espaço não condutivo (o ar) e um espaço de condutividade σ_h . A resposta deste modelo a uma fonte electromagnética, uniforme e variável no tempo, define a função de transferência. Deste modo, o termo função de transferência diz respeito a um modelo de Terra que é descrito por um sistema linear com um input e um output previsível, estabelecendo como tal, uma relação linear entre as propriedades físicas medidas no campo.

2.3. Indução num meio estratificado: conceito de resistividade aparente e fase

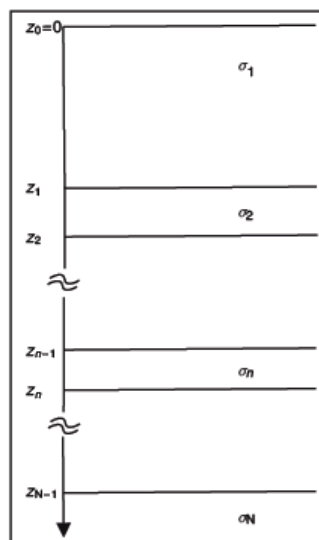


Figura 20 – Semi-espaço com N camadas (Simpson e Bahr, 2005).

A resistividade aparente pode ser definida como a resistividade de um meio homogéneo, com uma resposta semelhante à de um meio heterogéneo. Este conceito é um dos mais frequentemente usados na exibição de dados MT. A fase de impedâncias (ou simplesmente fase) é também uma importante grandeza MT, sendo que a impedância corresponde à oposição total à corrente eléctrica gerada por um sinal AC (corrente alternada). A resistividade aparente e a fase, ambas se representam normalmente em função do período (T), sendo estas não independentes uma da outra e relacionadas pela fórmula de Kramers-Kroenig (Weidelt, 1972 retirado de Simpson e Bahr, 2005). Quando a resistividade aparente aumenta, espera-se que o valor da fase decresça e vice-versa.

Podemos observar melhor a relação entre ambas na figura 21, que representa modelos da variação da resistividade aparente e fase em meios estratificados.

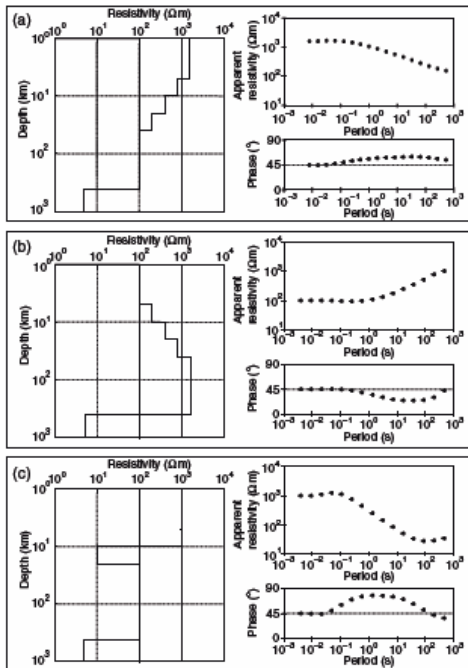


Figura 21 – Curvas de Resistividade aparente e fase geradas em meios estratificados nos quais: (a) a resistividade decresce em profundidade, com uma fase inicial de 45°, nos períodos mais pequenos, que aumenta ligeiramente a partir dos 10 Hz, consistente com o decréscimo da resistividade; (b) aumento da resistividade com a profundidade e fase de 45°, nos períodos mais pequenos, a qual posteriormente decresce, consistentemente com o aumento da resistividade; (c) representa uma camada de 10 Km na crosta média, com valores elevados de resistividade (Simpson e Bahr, 2005).

2.4. Indução em discontinuidades: modelo de Terra bidimensional e o conceito de polarização E e B.

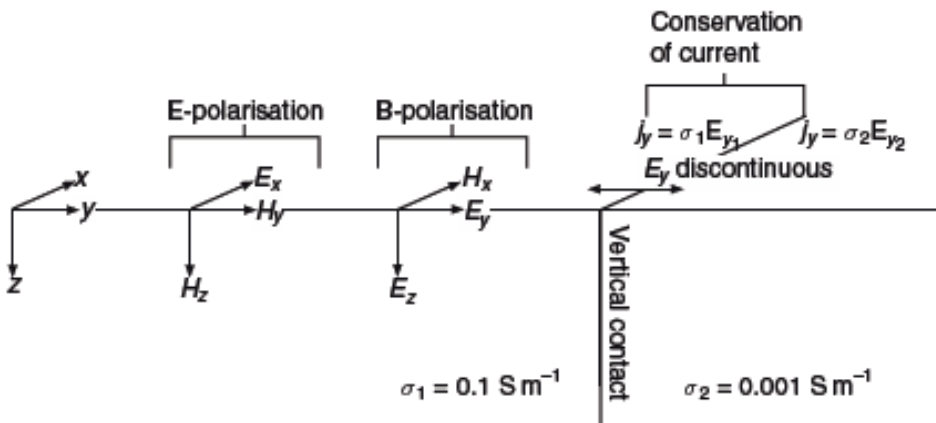


Figura 22 – Modelo 2D de um semi-espaco com um contacto vertical a separar dois meios com condutividades diferentes, onde se observam polarizações E e B (Simpson e Bahr, 2005).

O princípio físico que governa a indução numa discontinuidade vertical é a conservação da componente normal da densidade de corrente. Este facto obriga a que a componente y do campo eléctrico (E_y) tem que ser descontínua, sendo que todas as

outras componentes do campo electromagnético (E_x , H_x , H_y e H_z) são contínuas ao longo do contacto vertical. O cenário 2D representado na figura 22 pode corresponder ao um dique ou a uma falha, com uma condutividade constante ao longo do seu strike (direcção de camada, que neste caso corresponde ao plano do contacto vertical). Observa-se igualmente na figura que os campos, eléctrico e magnético, podem ser decompostos em dois modos diferentes:

- um que incorpora campos eléctricos paralelos à direcção de strike e induz campos magnéticos perpendiculares a este, e no plano vertical (**polarização E**);
- outro que incorpora campos magnéticos paralelos à direcção de strike e induz campos eléctricos perpendiculares a este, e no plano vertical (**polarização B**).

Deste modo, nestes meios 2D obtêm-se duas curvas de resistividade aparente e duas curvas de fase, correspondendo cada uma delas à polarização E e à polarização B, como se observa na figura 23.

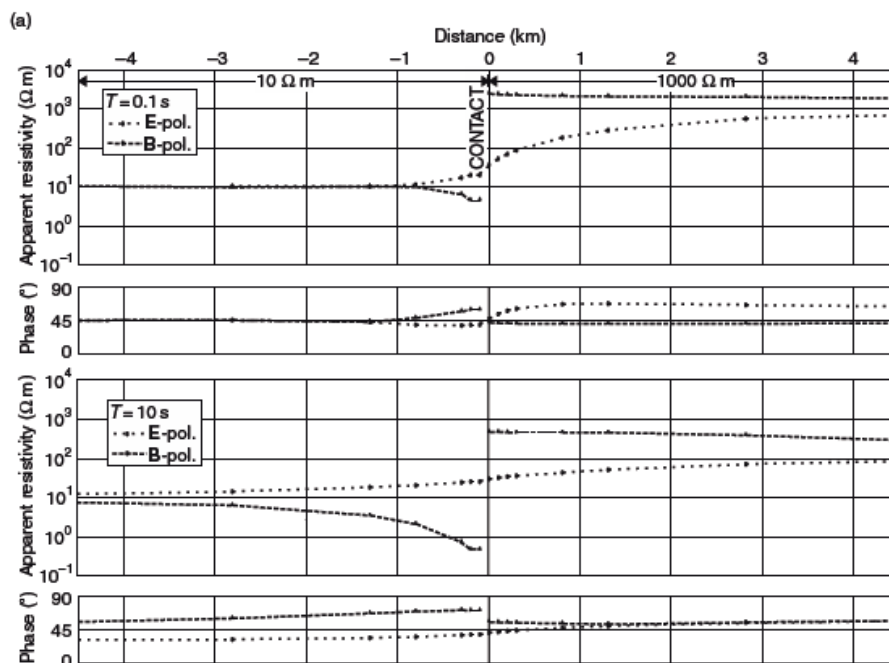


Figura 23 – Comparação entre curvas de resistividade aparente e fase, correspondentes a polarizações E e B, em função da distância ao contacto vertical observado na figura 6, para os períodos de 0.1 e 10 s. Observa-se que, enquanto a resistividade aparente da polarização E varia pouco através da descontinuidade, a resistividade aparente da polarização B é descontínua (Simpson e Bahr, 2005).

Como o E_y é descontínuo ao longo do contacto vertical, as impedâncias, $-Z_{yx}$ (a razão $\mu_0 E_y/B_x$) e Z_{yy} (a razão $\mu_0 E_y/B_y$), associadas a E_y são também descontínuas. A figura 23 mostra valores de resistividade (ρ_{yx}) para um conjunto de frequências em

função da distância ao contacto vertical da figura 22. Como consequência do comportamento descontínuo exibido por ρ_{yx} , as resistividades da polarização B tendem a mostrar, melhor do que as resistividades da polarização E, as variações laterais de condutividade.

2.5. O tensor das impedâncias e dimensionalidade

2.5.1. Direcções de strike (direcções regionais de camada)

Os processos dinâmicos relacionados com a tectónica de placas, modificam continuamente a estrutura da Terra. Enquanto algumas placas se afastam, outras convergem, alterando as direcções de tensão. Quando os vestígios destes processos são preservados, dão origem a ambientes tectónicos com alinhamentos estruturais, que por vezes existem em mais do que uma direcção (direcções de strike). É prática comum, em estudos de MT, a determinação individual para cada frequência e local de observação, da direcção principal de strike e a apresentação das curvas de resistividade aparente e fase, referenciadas de acordo com essa direcção, para que possam ser melhor interpretadas. A definição de uma *direcção principal regional* está ligada à possibilidade de separar o tensor de impedâncias em duas componentes: uma não perturbada, representativa da estrutura regional e uma perturbada (distorcida) pelas estruturas superficiais (Wannamaker et al., 1984; Zhang, 1989).

2.5.2. Tensor das impedâncias

O método MT é um método passivo que envolve a medição das flutuações naturais dos campos: eléctrico, em duas direcções ortogonais (E_x e E_y) e magnético, em duas (H_x e H_y) ou três direcções (H_x , H_y e H_z), à superfície da Terra. As componentes ortogonais horizontais dos campos, eléctrico e magnético (E_x , E_y , B_x e B_y), estão relacionados através de um tensor de impedâncias, Z:

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_x/\mu_0 \\ B_y/\mu_0 \end{pmatrix} \quad \text{ou} \quad E = ZB/\mu_0$$

sendo que μ_0 é a permeabilidade magnética do meio.

Z é complexo, sendo composto por uma parte real e outra imaginária. Como tal, cada componente Z_{ij} de Z possui não só magnitude como também uma fase.

As componentes de Z estão relacionadas com a resistividade aparente e fase pelas expressões:

$$\rho_{a,ij}(\omega) = \frac{1}{\mu_0 \omega} |Z_{ij}(\omega)|^2$$

$$\phi_{ij} = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}\{Z_{ij}\}}{\text{Re}\{Z_{ij}\}} \right).$$

Por ser um tensor, Z também contém informação sobre a dimensionalidade das estruturas do terreno. Para uma Terra **1-D**, onde a condutividade varia apenas com a profundidade, os elementos diagonais do tensor de impedâncias, Z_{xx} e Z_{yy} (que contêm componentes do campo eléctrico e magnético paralelos) são zero, enquanto que os componentes diagonal opostos do tensor (que contêm componentes do campo eléctrico e magnético ortogonais) são iguais em magnitude mas possuem sinais opostos, isto é:

$$Z_{xx} = Z_{yy} = 0$$

$$Z_{xy} = -Z_{yx}$$

Para uma Terra **2-D**, na qual a condutividade varia tanto horizontalmente como em profundidade, Z_{xx} e Z_{yy} são iguais em magnitude mas possuem sinais opostos, enquanto que Z_{xy} e Z_{yx} diferem, isto é:

$$Z_{xx} = -Z_{yy}$$

$$Z_{xy} \neq -Z_{yx}$$

No entanto, se a direcção x ou y forem alinhadas com a direcção do strike electromagnético, Z_{xx} e Z_{yy} são novamente iguais a zero. Como tal, matematicamente, a Terra 1-D anisotrópica é equivalente à Terra 2-D.

Com dados de campo, algumas vezes não é possível encontrar uma direcção na qual a condição $Z_{xx} = Z_{yy} = 0$ seja satisfeita. Este facto pode dever-se a distorções ou a indução 3-D (ou ambas). Geralmente a dimensionalidade evidenciada pelos dados é dependente da escala. Para períodos MT curtos, cujas profundidades de penetração atingidas são pequenas, quando comparadas às dimensões inferiores da anomalia, as funções de transferência revelam dimensionalidade 1-D. Com o aumento do período, o comprimento da escala indutiva estende-se eventualmente o suficiente para englobar,

pelo menos, um dos limites da anomalia, sendo que as funções de transferência passam a revelar uma dimensionalidade 2-D. Com o crescente aumento do período, os efeitos de todos os limites da anomalia iriam impor-se às funções de transferência, e estas iriam evidenciar dimensionalidade 3-D.

3. Planear uma campanha de aquisição de dados MT

A escolha de equipamento usado numa dada situação depende da profundidade pretendida. Em estudos crustais são frequentemente usados magnetómetros indutivos em bobine (induction coil magnetometers), com tempos de aquisição relativamente curtos e com processamento feito ainda no campo. Magnetómetros “fluxgate” respondem a períodos maiores do que os “induction coils” e logo são usados quando se pretendem atingir maiores profundidades (Simpson e Bahr, 2005).

3.1. Profundidades pretendidas e a escolha dos sensores e equipamentos adequados

3.1.1. Tempo de aquisição

As profundidades de penetração relacionam-se com o intervalo de tempo de aquisição, numa zona com uma condutividade mais ou menos conhecida ou estimada. Com vista a preparar uma campanha de aquisição de dados MT, podemos assumir condutividades médias de 0.001 Sm^{-1} , 0.02 Sm^{-1} e 0.1 Sm^{-1} , para a crosta Paleozóica, Mesozóica e Terciária, respectivamente. Por exemplo, iriam ser necessários períodos de 0.002 s a 10 s para explorar profundidades crustais de 1-50 Km de um cratão antigo e resistivo (Simpson e Bahr, 2005).

3.1.2. Sensores magnéticos e eléctrodos

Os dois principais tipos de sensores magnéticos, “induction coils” e “fluxgate”, medem as flutuações do campo magnético nas três direcções x, y e z. Como tal, é necessário instalar 3 magnetómetros no campo, dois na horizontal nas direcções norte-sul e este-oeste e um na vertical. A medição da direcção z do campo magnético é facultativa, como tal se esta não for medida, não se instala o magnetómetro vertical. As flutuações eléctricas são determinadas medindo a diferença de potencial, U, entre pares de eléctrodos, que são conectados por cabo de modo a formarem um dipolo, onde posteriormente são enterrados no chão a distâncias conhecidas (entre 10 a 100 metros). Os dois dipolos asseguram a medição das duas componentes horizontais do campo eléctrico. Estes dipolos são dispostos de modo a ficarem ortogonais entre si, com um deles orientado segundo o norte-sul magnético e o outro segundo a direcção este-oeste. Os magnetómetros e eléctrodos após colocados no terreno têm que ser ligados a um datalogger próprio para estudos de indução electromagnética, estando este ligado a baterias que lhe fornecem energia. Estas têm que ir sendo substituídas em estações de longa duração.

3.1.3. Fontes externas de ruído

Qualquer sinal medido de campo electromagnético correspondente a mecanismos não indutivos ou localmente indutivos, podem ser considerados como ruído.

O “static shift” (deslocamento estático) e correntes canalizadas, podem ser consideradas manifestações de ruído que surgem devido à complexidade de pequenas heterogeneidades do subsolo. Tais efeitos induzem correntes anómalas e concentração de cargas, dando origem a distorções difíceis de quantificar, que mascaram a assinatura geoelectrica das estruturas do subsolo. Fontes adicionais de ruído externas à Terra podem ser de três tipos: culturais, meteorológicas e dos sensores.

Em áreas habitadas, as linhas de alta tensão produzem campos electromagnéticos predominantemente de 50 Hz e 150 Hz. Caminhos-de-ferro, vedações eléctricas e auto-estradas, deverão também ser evitadas, sendo que os automóveis produzem perturbações magnéticas e sísmicas.

Uma fonte de ruído meteorológico é o vento, que faz vibrar as linhas telúricas, produzindo voltagens semelhantes a sinais telúricos de baixo período.

O efeito das variações de temperatura nos sensores e nos componentes electrónicos pode ser minimizada enterrando estes o máximo possível e escolhendo um local abrigado para colocar o “datalogger”.

3.1.4. Material fundamental para instalar uma estação de MT

- um “datalogger”;
- dois ou três magnetómetros;
- quatro eléctrodos;
- quatro cabos telúricos;
- cabos magnéticos de indução;
- uma estaca de metal (para ligar à terra);
- um GPS;
- uma fonte de energia (ex. baterias);
- um computador portátil (para fazer o download dos dados do “datalogger” e posterior processamento dos mesmos).

A estação de MT deverá assemelhar-se ao esquema da figura 24.

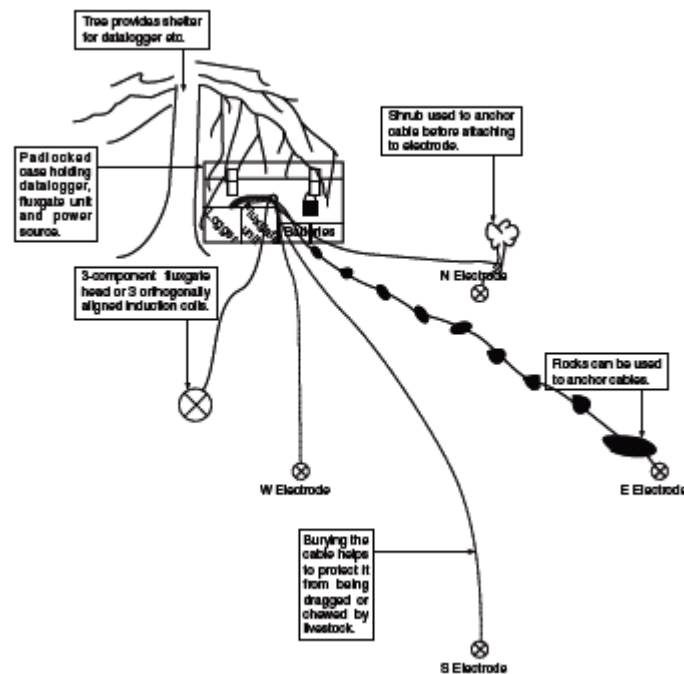


Figura 24 – Imagem esquemática de uma estação MT (Simpson e Bahr, 2005).

4. Processamento de dados

Durante uma campanha de aquisição de dados MT obtêm-se séries temporais, que após processamento permitem obter curvas de resistividade aparente e fase. Através da inversão destas curvas obtêm-se modelos passíveis de interpretação geológica. Uma vez que cada uma destas contém informação sobre muitos períodos, e como tal, muitas profundidades de penetração, o primeiro passo no processamento de dados envolve uma transformada de Fourier, passando do domínio do tempo para o domínio das frequências.

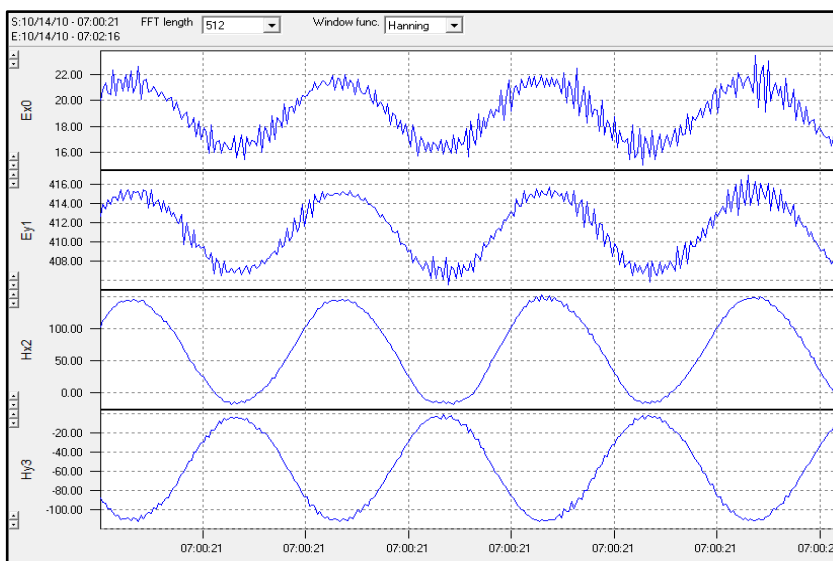


Figura 25 – Segmento de série temporal de dados adquiridos na Panasqueira (2010).

A figura 25 mostra uma série temporal registada no couro Mineiro da Panasqueira, mostrando os quatro gráficos correspondentes às quatro componentes do campo electromagnético (na Panasqueira foram medidas apenas as componentes horizontais do campo magnético, Hx e Hy). Aplicando a transformada de Fourier e um processamento robusto, obtêm-se o tensor das impedâncias e a partir deste, as curvas de resistividade aparente e fase.

As etapas fundamentais envolvidas no processamento de dados MT (Simpson e Bahr, 2005).

- **Transformada de Fourier, calibração e matriz espectral**
 - 1- Cálculo dos coeficientes de Fourier de um intervalo de uma série temporal;
 - 2- Calibração dos sensores;
 - 3- Avaliação das frequências e da matriz espectral;

- **Mínimos quadrados, referência remota e estimativa robusta das funções de transferências**

A figura 26 mostra de uma forma e esquematizada, as etapas envolvidas no processamento de dados MT.

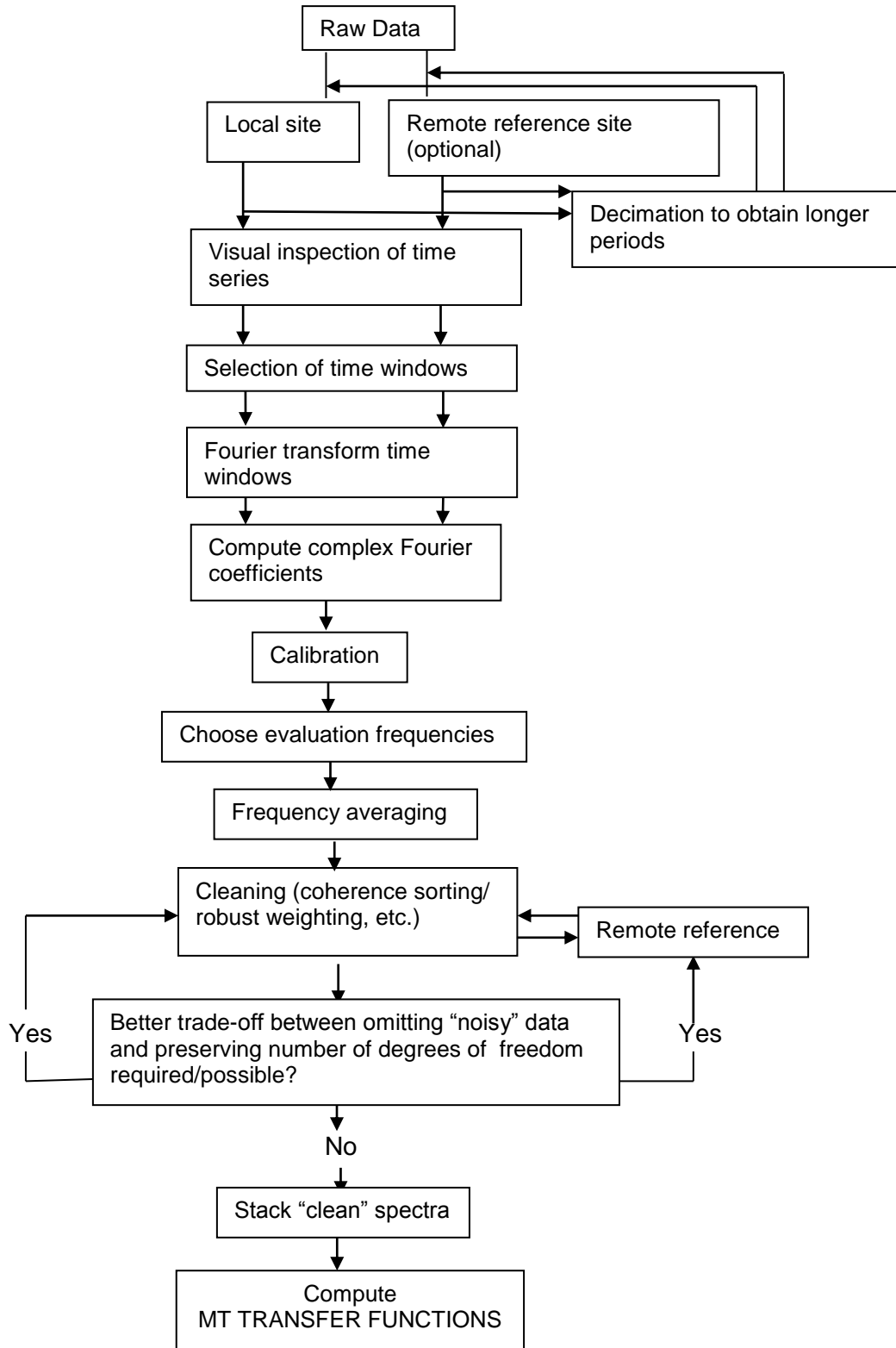


Figura 26 – Representação esquemática das etapas de processamento de dados MT (Simpson e Bahr, 2005).

4.1. Apresentação de dados

A apresentação dos dados de uma única estação é geralmente feita através de gráficos de resistividade aparente e fase, em função do $\log_{10} T$, no eixo das abcissas, como se observa na figura 27. No eixo das ordenadas do gráfico que representa a fase, temos graus (de 0° a 90°), uma vez que esta representa o ângulo de defasamento entre o campo eléctrico e magnético.

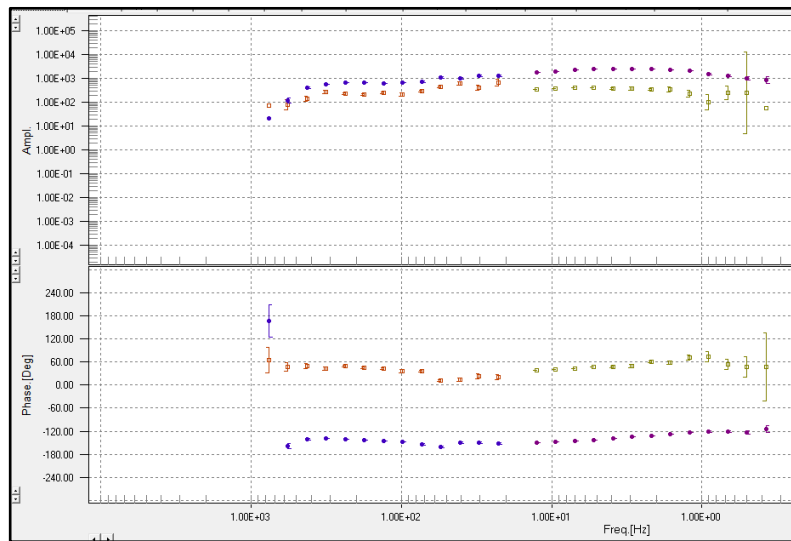


Figura 27 – Resistividade aparente e fase em função do período de uma estação MT montada na Panasqueira (2010).

A figura 28 representa um modelo de valores de resistividade aparente, de um perfil de estações MT, obtido por inversão 2D.

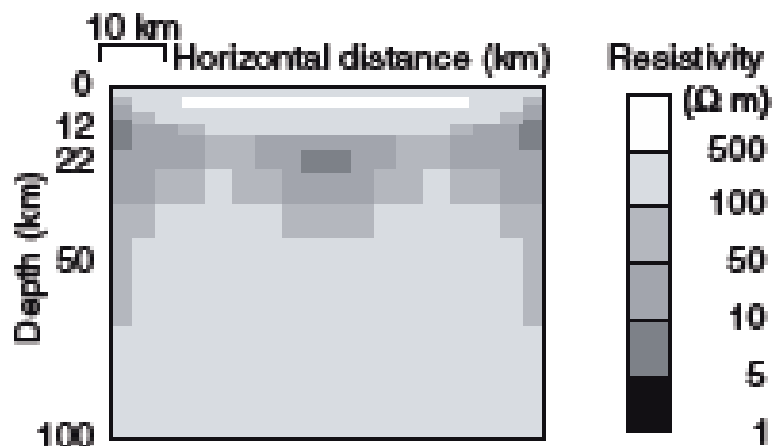


Figura 28 – Modelo de resistividades 2D obtido por inversão (Simpson e Bahr, 2005).

5. Distorção

5.1. Static shift

Os dados MT de uma ou mais estações podem estar afectados por “static shift” (deslocamento estático), causado por contrastes de condutividade de pequena escala. O deslocamento refere-se à curva de resistividade aparente, que aparece deslocada, ou para cima (apresentando valores de resistividade aparente mais elevados) ou para baixo (apresentando valores de resistividade aparente mais baixos). Este deslocamento é chamado de estático pois o princípio físico subjacente - a conservação de corrente em discontinuidades condutivas - não é um fenómeno dependente do tempo, ao contrário dos fenómenos de indução. Como tal, o fenómeno de “static shift” não afecta as curvas de fase.

As curvas representadas na figura 29 mostram o fenómeno de “static shift”.

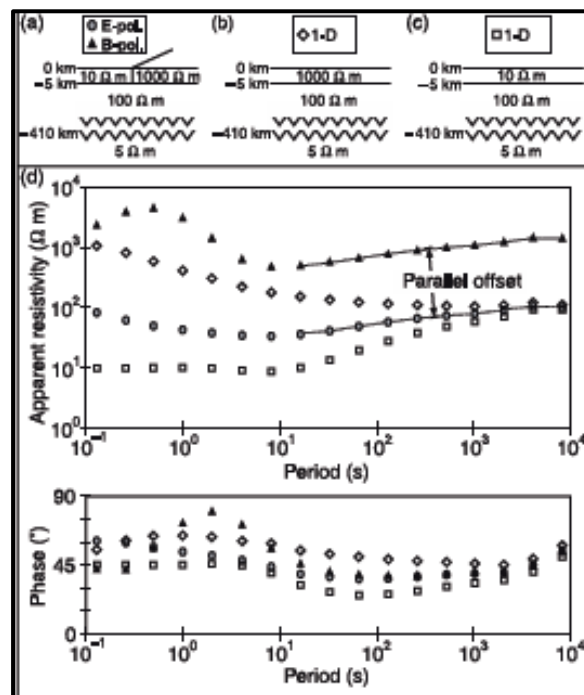


Figura 29 – a) Modelo 2D; b) e c) modelos 1D, com diferentes valores de resistividade para a camada de 0 a -5 Km; d) comparação de curvas de resistividade aparente e fase de um local afastado 300 m da fronteira lateral do modelo a) e curvas de resistividade e fase obtidas dos modelos b) e c). Para períodos longos, as resistividades aparentes 1D e polarização E do 2D, convergem para 100 $\Omega \cdot m$, valor correspondente à resistividade entre os -5 a -410 km. A polarização B do 2D, em vez de convergir para 100 $\Omega \cdot m$, está deslocada por static shift num factor constante, para períodos acima dos 10 s (Simpson e Bahr, 2005).

O “static shift” pode ser causado por qualquer contraste de condutividade multidimensional, com profundidades e dimensões inferiores às da profundidade de penetração do campo electromagnético. Descontinuidades condutivas causam distorções locais nas amplitudes do campo eléctrico (resultado da conservação de carga eléctrica), causando aumentos ou diminuições, por factores escalares, da magnitude da impedância.

5.1.1. Métodos de correcção do static shift:

- Comparação com dados de métodos activos (ex. TEM, DC). Os métodos electromagnéticos activos, como é o caso do transiente, não são afectados pelo “static shift”, logo as curvas de resistividade aparente dadas por este método, na ausência de “static shift”, deverão coincidir com as curvas de resistividade aparente dadas por MT. Caso as curvas MT se encontrem deslocadas, este deslocamento pode ser corrigido de modo a fazer coincidir estas com as curvas dadas pelo transiente;
- Técnicas estatísticas;
- Funções de transferência magnética de longo período.

6. Modelação directa e inversão de dados MT

Após o processamento de dados MT procede-se à obtenção de um modelo geofísico, cuja resposta se ajuste aos dados observados. Como tal, pretende-se que este modelo cumpra duas condições fundamentais: 1) que satisfaça o conjunto de dados recolhidos, de acordo com um critério pré-estabelecido, e 2) seja susceptível de ter interpretação geológica que esteja de acordo com a informação conhecida. O conjunto de propriedades que constituem o modelo deverá ser vasto.

A modelação da propagação do campo electromagnético tem sido abordado por vários autores de diferentes formas, tanto por métodos analíticos como por métodos numéricos. Nos casos em que a distribuição das resistividades é unidimensional, podem-se usar métodos analíticos para resolver as equações magneto-telúricas, bem como, efectuar a inversão dos dados. Nos casos em que a distribuição de resistividades é bidimensional, só através de métodos numéricos é possível resolver as equações magneto-telúricas.

Em MT a propriedade física utilizada na construção dos modelos geofísicos é a resistividade eléctrica.

Os modelos geofísicos podem-se obter através de modelação directa (problema directo) ou inversão (problema inverso).

O **problema directo** é um problema “bem-posto” no sentido em que, dado um conjunto de valores para os parâmetros e conhecidas as expressões que regem o comportamento do campo, a solução é única e pode ser calculada, em princípio, com a precisão que se desejar (F. M. Santos, 2006). Deste modo, por tentativa e erro, calculam-se as respostas com os dados observados, onde diferentes possíveis modelos são testados.

O **problema inverso** é, pelo contrário um problema “mal posto”, pois diferentes modelos podem representar igualmente bem os dados (na prática o problema inverso não tem solução única) e a solução é geralmente instável (F. M. Santos, 2006). Assim, a partir de relações matemáticas, procura-se obter a resposta que melhor se ajusta aos dados observados.

Tal como o nome sugere, a inversão permite ao utilizador, evoluir directamente dos dados para o modelo, ao contrário do problema directo. Mas tal como este último, a inversão é um processo iterativo, cujo objectivo é reduzir progressivamente o erro entre os dados adquiridos e o modelo obtido. A maioria dos esquemas de inversão 2D incorpora a filosofia “least-Structure”, sendo que alguns deles permitem incorporar no modelo detalhes de anisotropia (Simpson e Bahr, 2005). Apesar de terem já alguma utilização, os esquemas de inversão 3D são ainda pouco comuns. Neste trabalho contudo, os modelos obtiveram-se por inversão 2D e inversão 3D.

Para a resolução do problema inverso, existem vários algoritmos, de que são exemplos o OCCAM (Constable *et al.*, 1987) ou o REBOOC de Siripunvaraporn e Egbert (2002) (Almeida, 2009), entre outros.

Informação adicional e pormenorizada sobre o processo de inversão poderá ser consultado em (Simpson e Bahr, 2005).

Capítulo III - Modelação tridimensional (3D)

1. Porquê efectuar modelação 3D

Quando se processam e interpretam dados MT é bastante útil aplicar testes de dimensionalidade, a fim de se decidir qual o esquema de modelação numérico que melhor se adequa, visando a geração de funções de transferência sintéticas que sejam o mais aproximadas possível das que são medidas no campo.

Durante o tratamento e interpretação bidimensional de dados MT, é frequente que se encontrem funções de transferência distorcidas, revelando a existência de estruturas tridimensionais. Mesmo que tal não aconteça para toda a zona de estudo em questão, ou aconteça só para um intervalo limitado de períodos, uma interpretação 3D torna-se necessária para uma caracterização mais realista das estruturas.

A modelação de dados MT envolve a simulação computacional do processo de indução electromagnética. Quando se escolhe um algoritmo de modelação, é fundamental perceber se o mais conveniente é obter um modelo 1D, 2D ou 3D, isto é, qual dos modelos representa melhor a geologia: se um modelo de Terra estratificado (1D), se um modelo de Terra em que a condutividade varia numa direcção horizontal e numa vertical (2D) se um modelo de Terra em que a condutividade varia nas três direcções (3D). No entanto, há que ter em conta que a utilização de um código 3D requer um poder computacional elevado, longos períodos de cálculo e, acima de tudo, um grande dispêndio de tempo para o utilizador.

No passado, a modelação 2D era muitas vezes escolhida em detrimento da modelação 3D, devido a pelo menos uma das seguintes razões:

- a não existência de códigos 3D que conseguissem dar uma resposta adequada aos requisitos teóricos e ao tamanho da área em estudo;
- a não existência de testes de dimensionalidade ou a sua não utilização;
- o método magnetotelúrico era muitas vezes usado em conjugação com dados de sísmica, sendo que esta era utilizada sobretudo em modelos 2D;
- as aquisições MT eram efectuadas ao longo de perfis, e mesmo quando os testes de dimensionalidade indicavam a existência de estruturas 3D, os modelos 3D não podiam ser adequadamente estrangidos devido à falta de dados fora do perfil (Simpson e Bahr, 2005).

Presentemente, todas estas dificuldades estão a ser ultrapassadas e, embora ainda ocorram muitas situações em que é difícil instalar estações sem ser ao longo de um único perfil, foi demonstrado (Simpson, 2000) que mesmo quando as condições logísticas indicam uma distribuição de estações pouco ideal, um modelo 3D fornece

sempre uma melhor caracterização geométrica dos corpos condutores (Simpson e Bahr, 2005).

2. Elaboração de uma malha e condições de fronteira

No que diz respeito à modelação numérica 3D, foram propostos alguns métodos, usando quer as equações diferenciais, quer as integrais. Enquanto que os métodos de equações diferenciais abrangem na sua malha, tanto as anomalias condutoras como o ambiente, nos métodos das equações integrais apenas as anomalias condutoras são englobadas na malha. Estes últimos requerem, para modelos simples, menor poder computacional, e é provavelmente por esta razão que a maioria das primeiras contribuições que se realizaram, utilizaram esta técnica (Raiche, 1974; Hohmann, 1975; Weidelt, 1975; Wannamaker *et al*, 1948b).

Os métodos que usam as equações integrais, raramente têm sido usados na interpretação de dados electromagnéticos, provavelmente porque o modelo de uma anomalia isolada, envolvida por um semi-espaço estratificado, geralmente não corresponde a situações tectónicamente realistas. Em contraste, os métodos de equações diferenciais permitem a computação de campos eléctricos e magnéticos em estruturas condutivas arbitrariamente complexas. Usando estes métodos, o problema do valor de fronteira pode ser resolvido tanto para diferenças finitas (FD) como para elementos finitos (FE) (Mackie *et al.*, 1993; Mackie and Madden, 1993; retirado de Simpson e Bahr, 2005). Informação mais detalhada sobre ambos os métodos pode ser consultada no capítulo 6 de Simpson e Bahr, 2005.

Ao longo do tempo têm surgido alguns algoritmos de modelação 3D, tais como: algoritmos de modelação “thin-sheet” (ex. algoritmo “thin-sheet” de Vasseur e Weidelt, 1977); inversão 3D “thin-sheet” de Wang e Lilley (1999); algoritmos de modelação 3D de Diferenças Finitas (FD) (Jones e Pascoe, 1972; Masero *et al*, 1997; Simpson e Warner, 1998; Simpson, 2000; Leibecker *et al*, 2002; retirado de Simpson e Bahr, 2005). Os algoritmos de modelação “thin-sheet” têm sido aplicados com sucesso em estudos de interface terra/oceano e estudos de batimetria, desde que a profundidade de penetração pretendida ultrapasse a espessura da coluna de água. Os algoritmos de modelação 3D FD surgiram mais tarde e têm sido aplicados numa vasta gama de problemas tectónicos e geodinâmicos.

Para que um algoritmo de modelação 3D possa ser aplicado com sucesso, é fundamental a predefinição de uma malha tridimensional adequada à complexidade do

problema. Existem algumas regras que se devem seguir para conseguir esse objectivo, entre as quais (Simpson e Bahr, 2005):

1. Definição de pelo menos duas profundidades de penetração electromagnéticas em cada lado de uma fronteira vertical ou horizontal, separando duas regiões com diferentes condutividades. A distância entre nós não deverá ultrapassar 1/4 da profundidade de penetração electromagnética. Esta condição pode ser desprezada a maiores distâncias, onde o gradiente de campo é já menor.
2. A primeira e última colunas verticais da malha deverão estar colocadas a uma distância correspondente a pelo menos três vezes a profundidade de penetração, além da fronteira vertical de condutividade mais próxima. O termo “profundidade de penetração” aqui refere-se à profundidade da onda electromagnética na camada mais resistiva do modelo 1D correspondente.

A computação de dados para diferentes períodos irá resultar em diferentes profundidades de penetração electromagnéticas. A regra número 1 implica que a distância entre nós possa ser aumentada com o aumento da distância à zona central do modelo.

Por sua vez, a regra 2 é uma consequência prática do conceito de “adjustment length”: uma fronteira de condutividade vertical pode influenciar o campo electromagnético numa distância equivalente a duas ou três vezes a profundidade de penetração electromagnética (Simpson e Bahr, 2005).

A definição da malha envolve um compromisso entre o tempo de cálculo e a precisão do modelo. O efeito da distância entre nós e o tamanho do modelo, constituem-se como factores importantes na modelação de dados.

Para testar se a malha definida para um dado modelo é adequada, pode-se proceder primeiro à elaboração do modelo, com uma malha que obedece às três regras referidas anteriormente, seguindo-se a diminuição do espaçamento entre nós (aumentando simultaneamente o seu número).

Se as estruturas condutoras não sofrerem nenhuma alteração significativa, é porque a malha escolhida é bastante adequada. Por outro lado, se as estruturas condutoras sofrerem perturbações significativas, a malha inicial deverá ser apertada e o processo repetido. A figura 30 representa um exemplo de uma malha 3D.

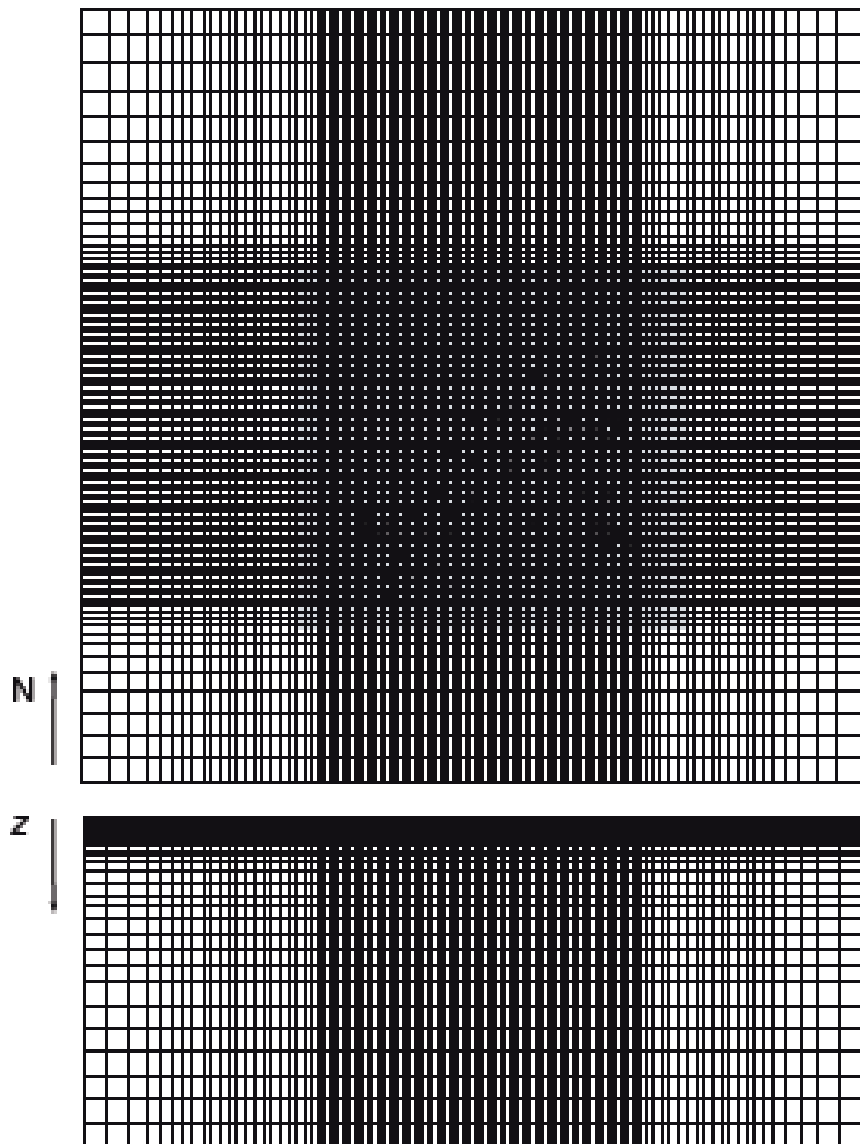


Figura 30 – Exemplo de uma malha 3D. A secção horizontal (em cima) consiste em 103 x 119 células e representa uma área de 858 x 923 Km². Os pontos a preto simbolizam as estações MT efectuadas que se situam no centro da malha, onde as dimensões das células são 5 x 5 Km². A secção vertical (em baixo) contém 34 camadas e vai até uma profundidade de 420 Km (Simpson e Bahr, 2005).

3. Desajustes

Entende-se por desajuste (ε^2) a diferença entre os dados de campo e os dados modelados, sendo expresso pela seguinte equação:

$$\varepsilon^2 = \sum_{j=1}^{j_{sites}} \sum_{i=1}^{i_{freq}} \frac{|C_{ij} - C_{ij, mod}|^2}{|\Delta C_{ij}|^2},$$

onde C_{ij} , $C_{ij, \text{mod}}$ referem-se às funções de transferência (na estação j e para a frequência i), medidas e calculadas, e ΔC_{ij} é o intervalo de confiança dos dados adquiridos.

Embora sejam desejados valores de desajustes muito baixos, na prática é muito raro obtê-los. Na modelação 1D ou 2D isto acontece, devido ao facto de os dados raramente corresponderem a estruturas verdadeiramente 1D ou 2D. Mesmo na modelação 3D, os dados normalmente não permitem um elevado ajuste, pois a área representada pelo modelo 3D não é densamente preenchida com estações MT. Mesmo assim, a modelação 3D apresenta vantagens, pois através dela podemos testar se a introdução de uma característica particular se adequa aos dados reais, fazendo correr vários modelos. Se sim, o desajuste deverá baixar com a introdução dessa mesma característica.

O balanço correcto entre um modelo detalhado e um grosseiro, normalmente gera desajustes baixos (Simpson e Bahr, 2005).

O parâmetro de desajuste expressado na equação anterior, expressa um valor matemático arbitrário, pois é possível obter modelos com o mesmo valor de desajuste, mas que contêm mais ou menos estruturas, relativamente às que estão presentes nos dados reais. Assim, vale a pena efectuar uma comparação entre as funções de transferências medidas e as modeladas, como exemplifica a figura 31.

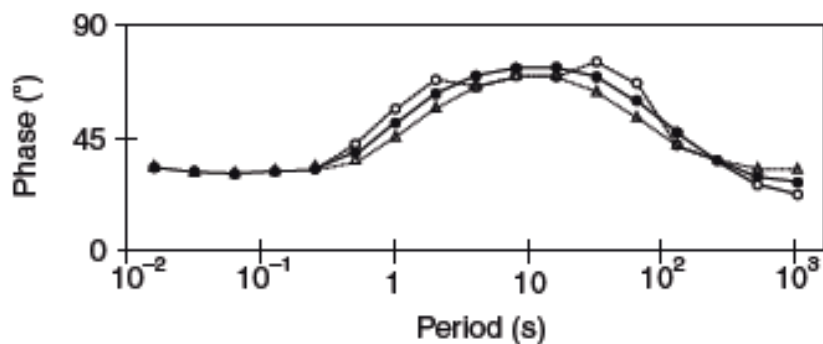


Figura 31 – Duas curvas de fase (com linha a tracejado, uma com triângulos e outra com círculos) com o mesmo valor de desajuste (ϵ^2) relativamente à curva de fase representada pela linha a cheio (com círculos escuros). No entanto, as formas das duas primeiras curvas são diferentes (Simpson e Bahr, 2005).

Sendo a modelação 3D um processo extremamente complexo, existem alguns aspectos que simplificam este.

Uma situação bastante comum é iniciar a modelação usando um modelo de partida muito complicado. Supondo que a análise dimensional sugere que se está perante

uma situação 3D e, como tal, se opta por modelação 3D, não é recomendável utilizar um modelo inicial muito complicado, mesmo que os dados indiquem a existência de uma grande diversidade de estruturas condutivas.

Uma abordagem mais eficaz consiste em começar com um modelo simples e observar a forma como as funções de transferência modeladas se desenvolvem à medida que o modelo se complexifica.

Outra situação que exige uma atenção especial relaciona-se com alguns parâmetros de um dado modelo, como a forma, a espessura e a condutividade dos corpos em profundidade. O constrangimento de um corpo condutor pode facilmente ser investigado usando a modelação. Alterando a forma, a espessura e o valor de condutividade de um dado corpo e, durante este processo, comparar os desajustes produzidos pelas diferentes alterações, permite constranger esse mesmo corpo da forma mais adequada.

Estes procedimentos, também conhecidos como testes de sensibilidade, permitem-nos encontrar o modelo que melhor se ajusta aos nossos dados, e cujos corpos condutores melhor se aproximam aos corpos reais da área em estudo.

**Capítulo IV - Campanha de prospecção MT da
Panasqueira – Análise e discussão de dados e
modelos.**

1. Campanha de prospecção MT

A campanha de prospecção nas Minas da Panasqueira compreendeu dois momentos de aquisição de dados. Numa primeira fase efectuou-se um perfil (Perfil Inicial), o qual passou por cima das galerias da mina, com o objectivo de se fazer um reconhecimento inicial da zona e cujas estações MT estão marcados na figura 32 a vermelho. Numa segunda fase, com base no perfil inicial, escolheram-se duas áreas de interesse, onde se delineou uma malha de estações MT para cada uma delas: uma área na zona sul do perfil (Área Sul) e uma área na zona norte do perfil (Área Norte), cujos pontos se encontram marcados na figura 32, a verde e a azul, respectivamente.

Estas áreas de interesse foram escolhidas com base na existência de dois corpos resistivos (um em cada área), que poderão corresponder a duas intrusões graníticas. Neste trabalho, apenas serão objecto de estudo os dados do Perfil Inicial, com o objectivo de se elaborar um modelo 2D, e os dados da Área Sul com o objectivo de se elaborar um modelo 3D.

É importante referir que os modelos obtidos com dados MT só conseguem revelar contrastes de resistividade, laterais e verticais, de grande escala, não sendo por isso possível visualizar contrastes de pequena escala, como os que corresponderiam aos filões mineralizados do jazigo da Panasqueira. Assim sendo, é espectável visualizar em profundidade nos modelos, por exemplo, contrastes de resistividade causados por zonas de fronteira de litologias diferentes, contrastes provocados por zonas de falhas, entre outras situações. Esta resolução, apenas em grande escala, por um lado pode-se explicar devido ao facto de em MT se trabalhar com frequências e comprimentos de onda relativamente elevados, e por outro lado, devido ao princípio físico que está por detrás deste método, nomeadamente o facto de a propagação de um campo electromagnético num meio condutor ter por base o fenómeno de difusão.

Nos modelos MT, os contrastes laterais de resistividade, têm uma maior resolução/grau de certeza quanto menor o espaçamento entre as estações, enquanto que os contrastes verticais de resistividade têm uma maior resolução/grau de certeza quanto maior for o número de frequências usadas na investigação.

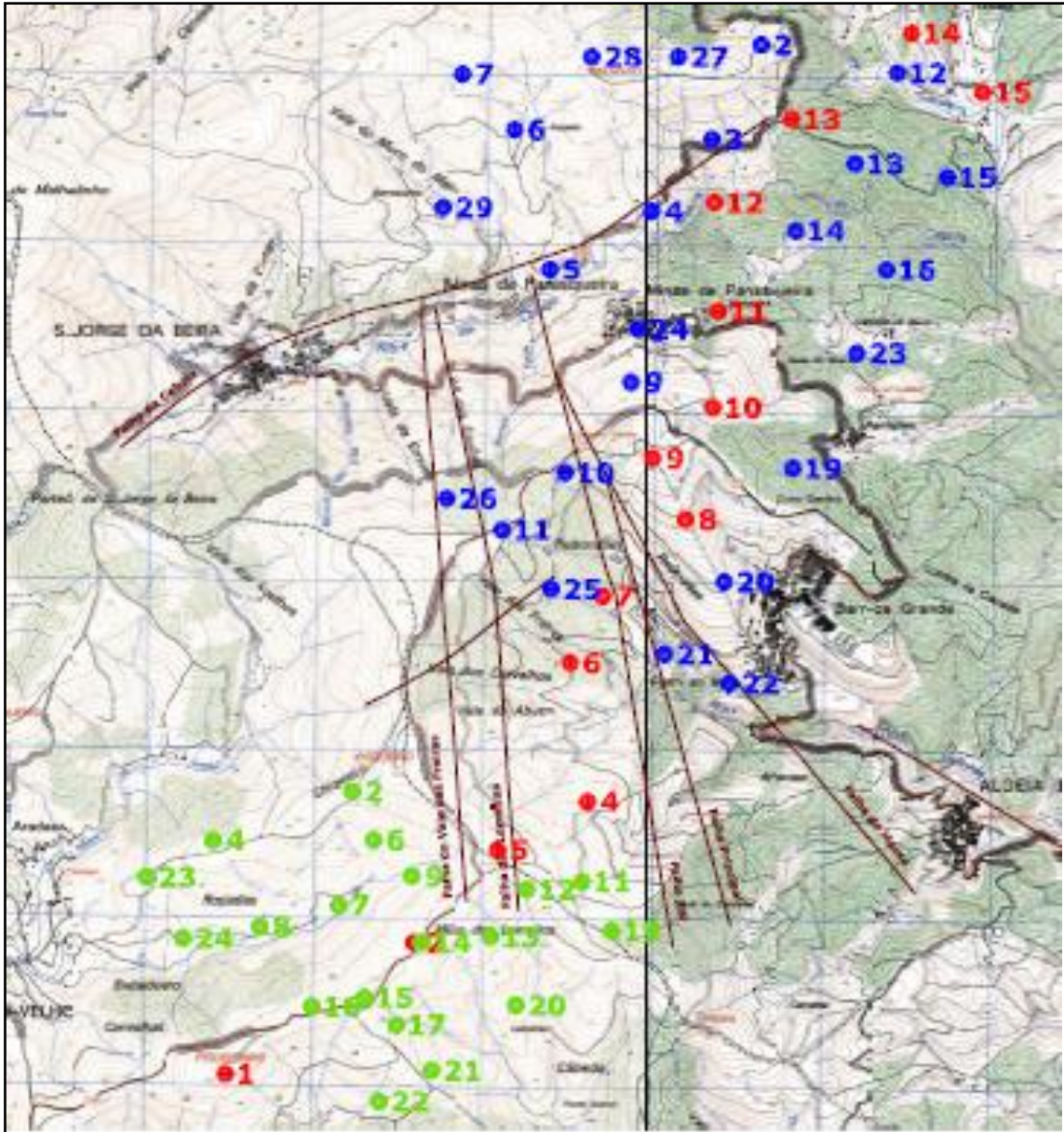


Figura 32 – Localização das estações de MT no couro mineiro da Panasqueira. Estão representadas: a vermelho, as estações do Perfil Inicial; a verde, as estações da Zona Sul e a azul, as estações da Zona Norte.

2. Perfil Inicial (modelos 2D)

2.1. Aquisição de dados do Perfil Inicial

O Perfil Inicial tem uma direcção aproximada de N45E e extensão de cerca de 7 km, na região do Couto Mineiro da Panasqueira. O objectivo inicial era a realização de 15 estações MT, com um espaçamento entre estações de aproximadamente 500 m, como se observa na figura 33. No entanto, só se conseguiram efectuar 14 estações das 15 previstas, devido a alguns constrangimentos geográficos. Este tipo de constrangimentos, tais como: topografia muito irregular, vegetação muito densa e a proximidade de linhas de média e alta tensão, podem baixar a qualidade dos dados adquiridos, ou mesmo inviabilizar a realização de algumas estações de aquisição. Deste modo, a estação 3 não se efectuou, devido ao facto da sua localização coincidir com a de uma linha de alta tensão.



Figura 33 – Localização do Perfil Inicial. Imagem do Google Earth

As restantes 14 estações MT foram adquiridas com equipamentos de magnetotelúrica Metronix ADU06, do Centro de Geofísica da Universidade de Lisboa, sendo realizadas numa banda de frequências desde os 0,01 Hz até aos 1000 Hz. Em cada estação foram adquiridas as componentes horizontais dos campos eléctricos e magnéticos, segundo as direcções Norte-Sul (eixo X) e Este-Oeste (eixo Y).

Verificou-se uma diminuição acentuada na qualidade dos dados adquiridos abaixo de 1 Hz (períodos longos), afectando o grau de certeza nos modelos finais, para profundidades mais elevadas (>5 km). Esta diminuição na qualidade dos dados pode dever-se ao facto da quantidade de energia diminuir nestes valores de frequência (“dead band”), a que se faz referência no capítulo 2 (figura 16) e o tempo de aquisição não ter sido suficiente para a obtenção de dados mais coerentes, na maioria das estações efectuadas. Verificou-se também uma diminuição da qualidade dos dados em frequências superiores a 1000 Hz (períodos mais rápidos), que pode dever-se à existência de ruído electromagnético devido a variadas fontes: actividade da mina, actividades nas vilas, antenas de comunicação, etc.

2.2. Análise preliminar dos dados

Após a aquisição das séries temporais das componentes horizontais dos campos eléctricos e magnéticos, para as várias gamas de frequências medidas, procedeu-se à sua inspecção visual de modo a retirarem-se os segmentos de ruído mais significativos, que podem ser identificados como variações bruscas de elevada amplitude nos campos eléctrico e/ou magnético. Embora a zona da Panasqueira não fosse isenta de ruído electromagnético, como já referido, este não foi significativo ao ponto de inviabilizar a realização da maioria das sondagens MT. Este ruído no entanto, revelou-se bem marcado nas frequências mais altas (> 1000 Hz), o que impossibilitou a execução de sondagens TDEM, que permitiriam corrigir o “static shift” das curvas de MT, caso estas se encontrassem afectadas por este. A impossibilidade de se fazer TDEM, também se pode explicar pelo facto deste método funcionar melhor em meios condutores e a Panasqueira estar enquadrada num ambiente geológico bastante resistivo (xistos, grauvaques e intrusões graníticas)

Nas figuras 34, 35 e 36 podemos observar alguns segmentos de séries temporais para ambos os canais eléctricos e magnéticos, nas várias bandas de frequências medidas (tabela 6).

Tabela 6 – Tabela das gamas de frequências com os respectivos valores em Hertz.

Bandas de frequências medidas	Intervalos correspondentes em Hz
LF3	0,001-0,6 (aproximadamente)
LF2/Free	0,6-40 (aproximadamente)
LF1	30-1200 (aproximadamente)

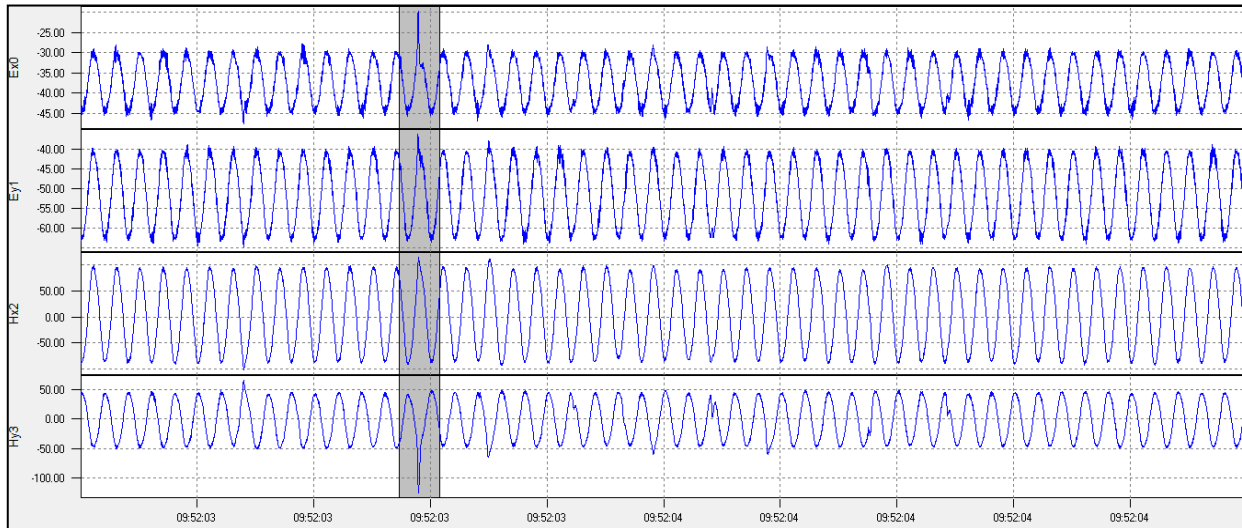


Figura 34 – Exemplo de um segmento de série temporal da banda LF1 (altas frequências) para os canais eléctricos e magnéticos (Ex, Ey, Hx, Hy). O eixo dos yy corresponde à amplitude em mv e o eixo dos xx corresponde ao tempo em horas. Os segmentos a sombreado correspondem a segmentos de ruído retirados.

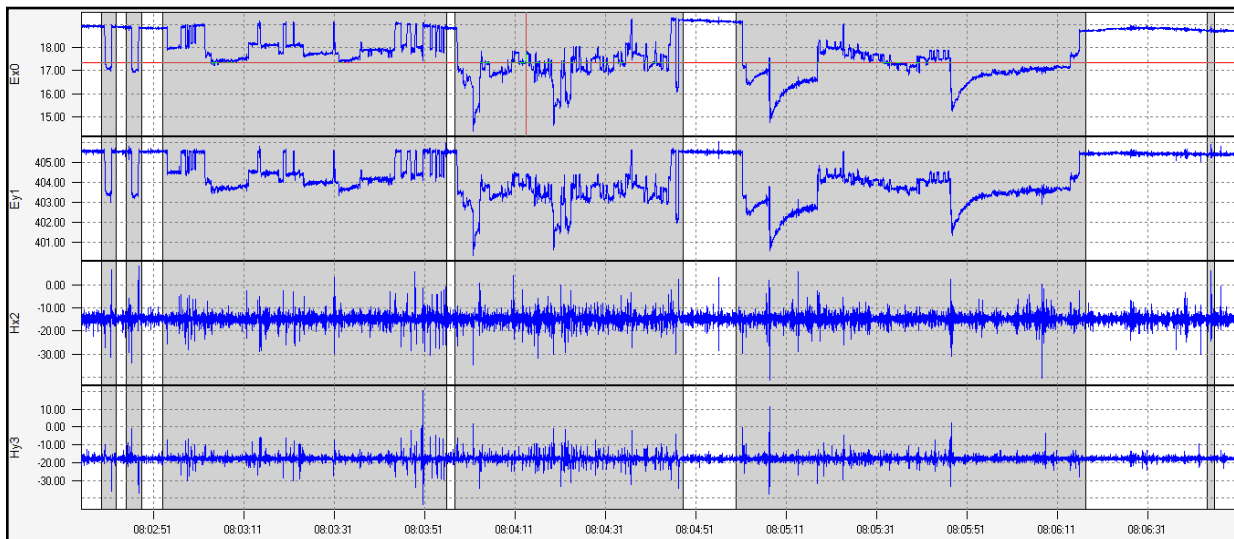


Figura 35 – Exemplo de um segmento de série temporal da banda LF2 (médias frequências) para os canais eléctricos e magnéticos (Ex, Ey, Hx, Hy). O eixo dos yy corresponde à amplitude em mv e o eixo dos xx corresponde ao tempo em horas. Os segmentos a sombreado correspondem a segmentos de ruído retirados.

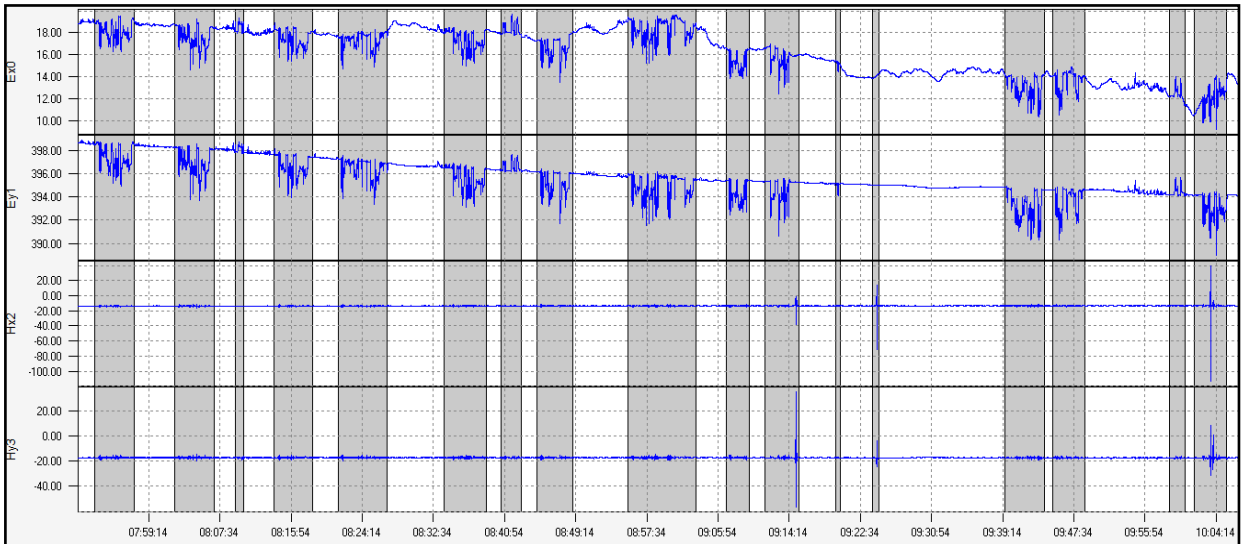
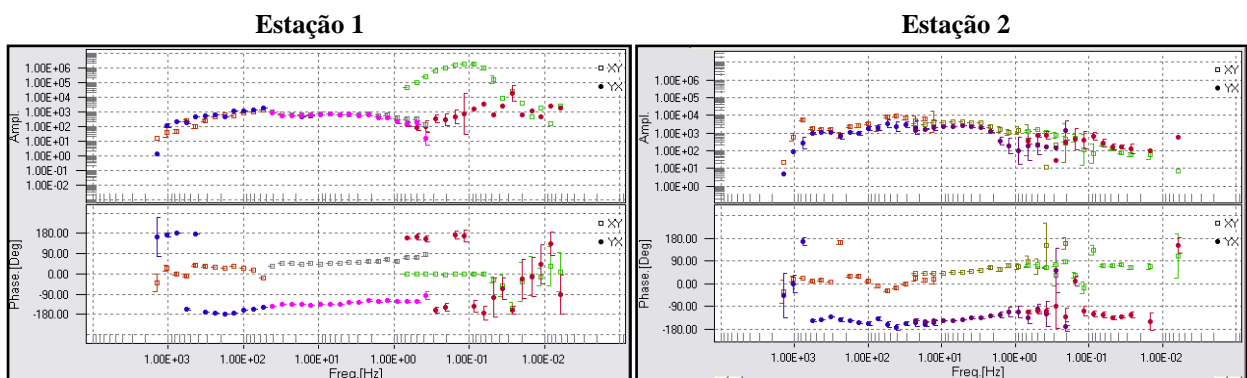


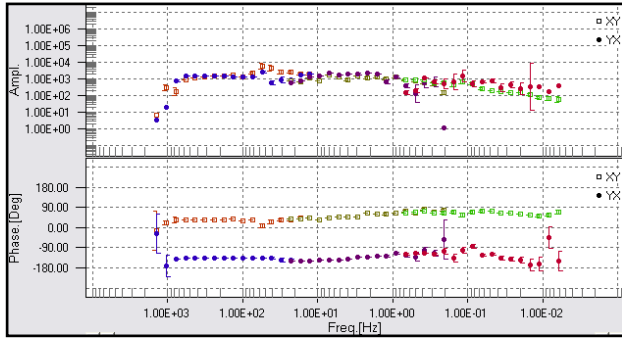
Figura 36 – Exemplo de um segmento de série temporal da banda LF3 (baixas frequências) para os canais eléctricos e magnéticos (Ex, Ey, Hx, Hy). O eixo dos yy corresponde à amplitude em mv e o eixo dos xx corresponde ao tempo em horas. Os segmentos a sombreado correspondem a segmentos de ruído retirados.

As séries temporais, de um modo geral, encontram-se afectadas por ruído, como se constata pela observação das figuras acima. No entanto, pela análise das 3 bandas de frequências representadas (LF1, LF2 e LF3) constata-se que o ruído é mais significativo nas bandas de frequências mais baixas (LF2 e LF3). Este nível de ruído pode dever-se tanto à actividade da mina, como à proximidade de cabos de alta e média tensão e turbinas eólicas, de algumas das estações efectuadas.

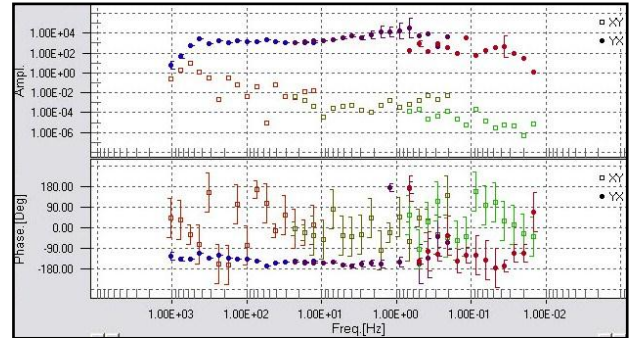
Após a análise do ruído das séries temporais, estas foram processadas, aplicando-se métodos robustos, referenciados no ponto 4 do capítulo 2, de modo a obterem-se, para cada uma das estações, os tensores de impedâncias e as respectivas curvas de resistividade aparente e fase, como se pode observar nos gráficos da figura 37.



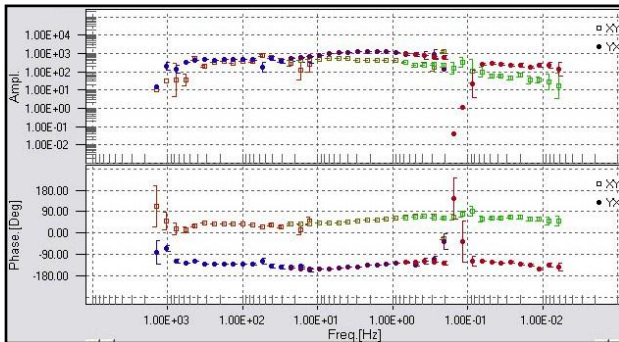
Estação 4



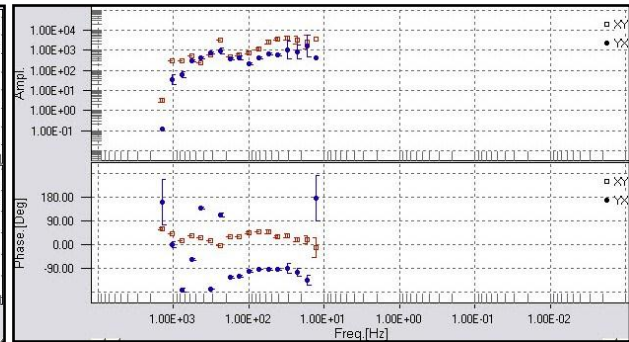
Estação 5



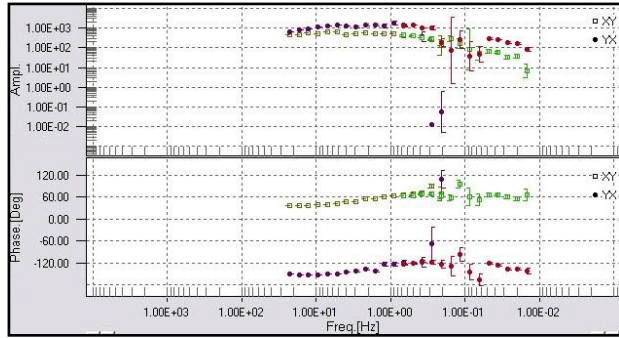
Estação 6



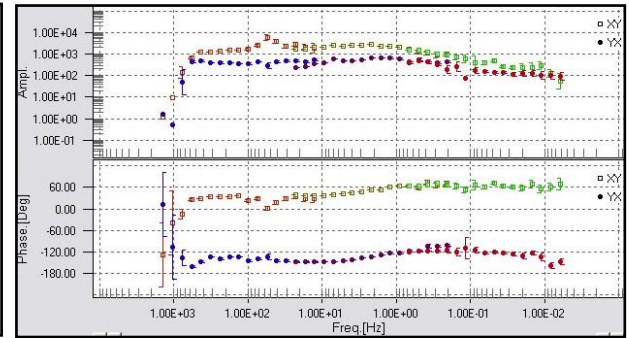
Estação 7 – LF1



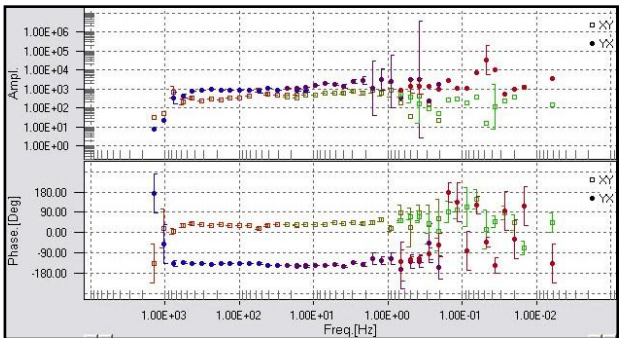
Estação 7 – LF2 e LF3



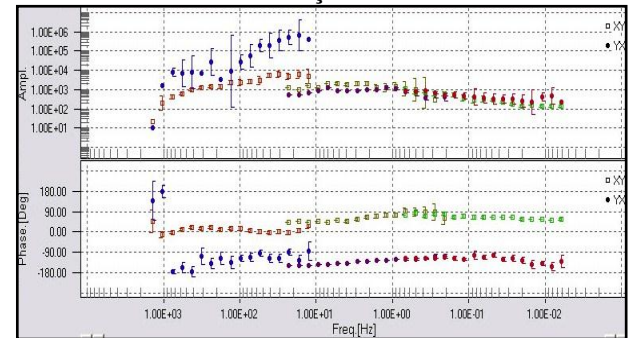
Estação 8



Estação 9



Estação 10



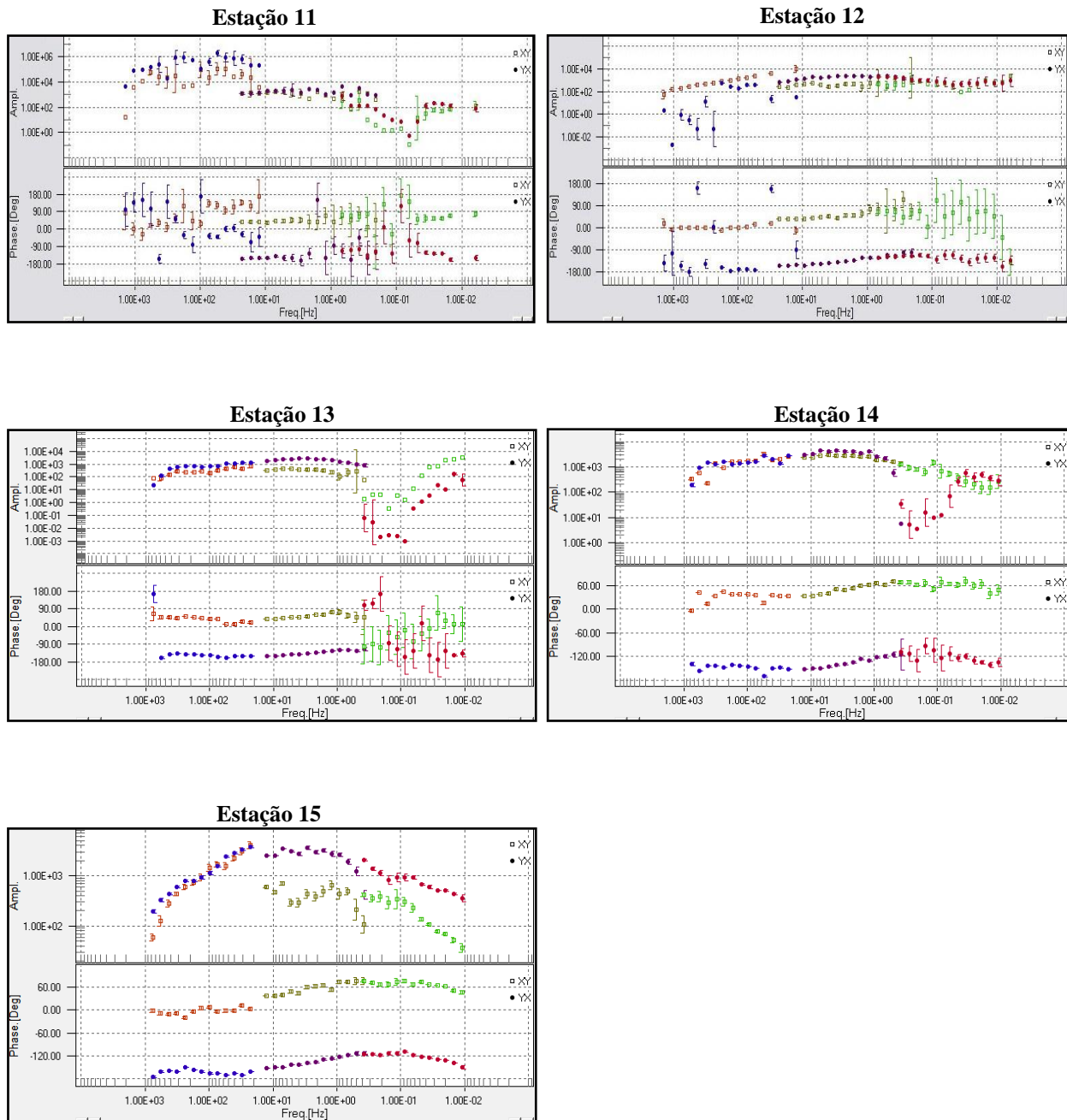


Figura 37 – Curvas de resistividade aparente (curva da Ampl em ohm.m) e fase (curva da Phase) das 14 estações do perfil Inicial.

Após interpretação das curvas de resistividade aparente e fase da figura anterior, conclui-se que a banda de frequências LF3 (abaixo dos 0,6 Hz) encontra-se, na maioria das estações, com uma qualidade muito pouco satisfatória, como já tinha sido constatado na inspeção visual das séries temporais. No entanto, uma vez que neste estudo, o intervalo de profundidades que se pretende estudar vai aproximadamente, até aos 1500-2000 m (zona superficial), as bandas LF1 e LF2 serão as mais importantes e, como tal, foram as consideradas na análise da qualidade dos dados.

Paula Póvoa

Deste modo, observa-se que a maioria das estações possui uma qualidade satisfatória, com excepção das estações 5, 11, 12 e 15. A fraca qualidade observada nestas estações pode-se justificar devido aos seguintes factos: a realização da estação 5 nas proximidades da linha de transporte de corrente de aerogeradores, a realização das estações 11 e 12 perto de uma linha de alta tensão e a realização da estação 15 na proximidade de habitações.

Analisando a banda de frequências mais altas - LF1 (acima dos 30 Hz), nas curvas de resistividade aparente e fase, nota-se um nível de ruído elevado, como já referido anteriormente, nomeadamente nas estações 7, 10, 11, 12 e 15, onde é possível observar a existência de pontos problemáticos. Este tipo de pontos, ou se encontram desviados do alinhamento normal das curvas ou possuem erros associados bastante elevados, sendo comum observar-se ambas as situações. Dada a sua falta de coerência, estes foram eliminados das curvas, antes de se proceder à obtenção dos Modelos 2D de resistividade. Na figura 38 (A e B) podemos visualizar um exemplo de curvas de resistividade aparente e fase, antes e depois da eliminação dos pontos problemáticos, respectivamente.

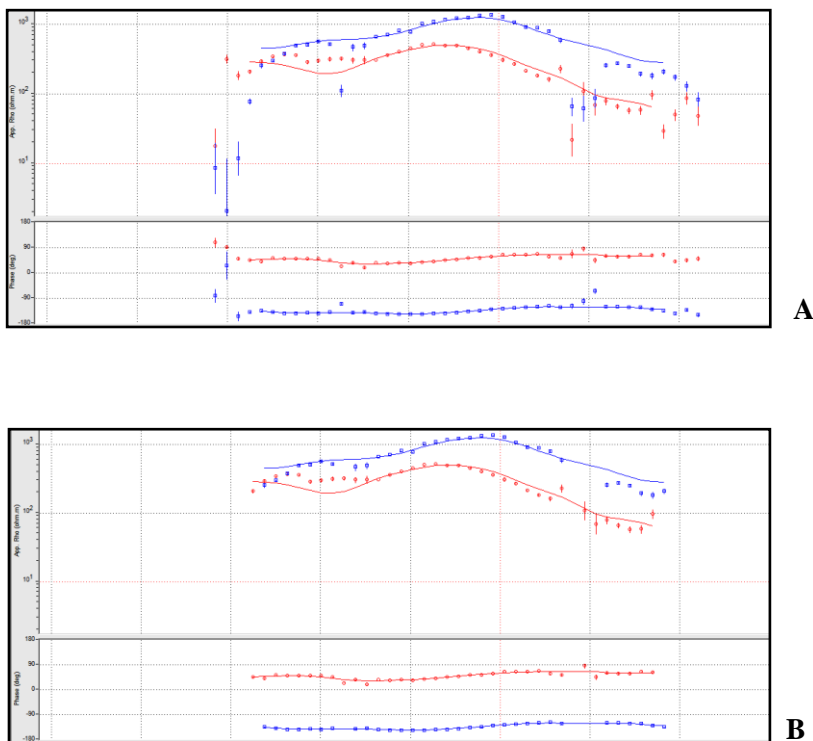


Figura 38 – (A) Curva de resistividade aparente e fase, da estação 6, antes da eliminação de pontos problemáticos. (B) Curva de resistividade aparente e fase, da estação 6, depois da eliminação de pontos problemáticos. O eixo dos xx de ambas as curvas correspondem às frequências em Hz.

Podemos observar também, que na maioria das curvas de resistividade aparente, os valores desta, apesar de sofrerem algumas oscilações, se situam em média nos 1000 Ohm.m. Como tal, podemos concluir que as curvas não se encontram afectadas por “static shift”.

Antes de se proceder à inversão 2D dos dados MT, realizou-se a análise da dimensionalidade e determinação da direcção regional (direcção de strike), do perfil em questão. Na tabela 7 podemos ver os valores de “strike” para cada uma das estações MT, os quais foram obtidos usando-se o modelo de Torquil Smith.

Tabela 7 – Valores de Strike geoelectrico para cada estação MT (modelo de Torquil Smith).

Estações MT	Valor de strike (em °)
1	-45
2	-68
4	-90
5	-15
6	-22
7	-90
8	-18
9	-20
10	-20
11	-90
12	-80
13	-15
14	-45
15	-70

Os mesmos resultados podem ser representados num gráfico polar, como se observa na figura 39.

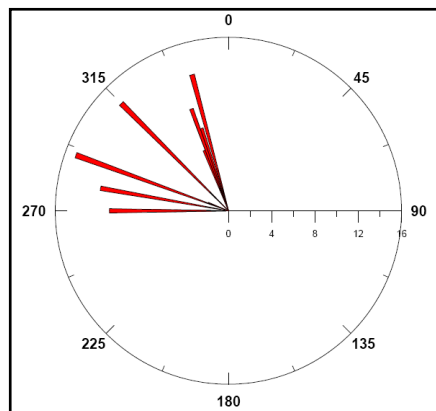


Figura 39 – Direcção de “strike” para cada uma das sondagens.

Como já seria de esperar, devido à influência de diferentes sistemas de falhas na zona mineira, com direcções distintas, os valores de “strike” nas várias estações são bastantes distintos. Esta variedade de ângulos de “strike” também pode ser justificada pelo efeito da topografia extremamente irregular da Panasqueira, ou mesmo ainda, devido à possível existência de estruturas que não são 2D mas sim 3D (por exemplo, Intrusões magmáticas). Este facto é bastante importante, pois neste caso a adopção de um modelo 2D, não se considerando a direcção mais correcta para se fazer esta aproximação, pode conduzir a resultados menos fiáveis. Mesmo assim, considerou-se o valor de N45W como o valor médio de “strike” regional.

2.3. Modelos 2D obtidos por inversão

Assumindo o valor de “strike” de N45W, calculado anteriormente, procedeu-se à rotação dos componentes do tensor das impedâncias a N45E.

A inversão foi efectuada conjuntamente para os valores de resistividade aparente e fase das estações do perfil, para ambas as polarizações TE (polarização E) e TM (polarização B), com erros inferiores a 4%.

Obtiveram-se três modelos 2D de resistividade (Modelo 1, 2 e 3) para o mesmo perfil. Estes modelos foram obtidos através da alteração de alguns dos parâmetros de inversão, resultando daí pequenas diferenças entre eles, como se observa nas figuras 40, 41 e 42. Esta diferença de parâmetros, consiste essencialmente:

interpolação de dados no modelo 1; no uso de dados não interpolados (dados reais), no modelo 2; no uso de interpolação de curvas ajustadas, no modelo 3.

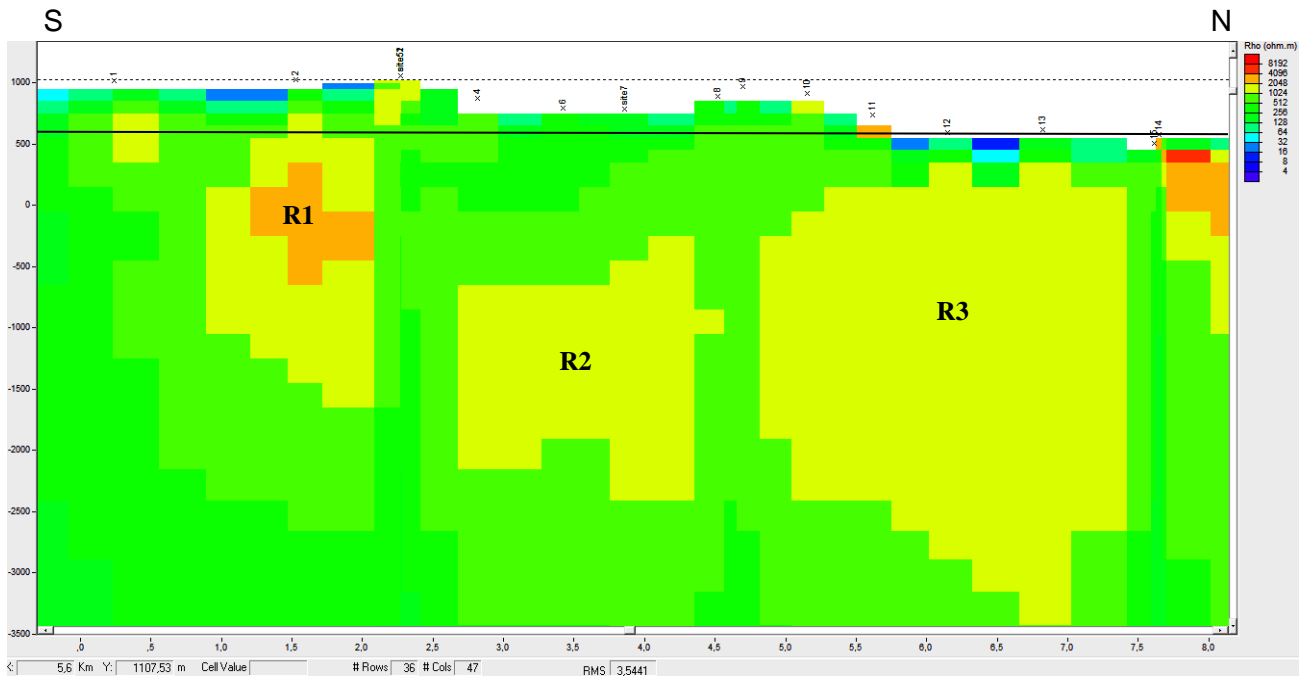


Figura 40 – Modelo 1, obtido por inversão 2D, com erro (RMS) de 3,5. O eixo dos xx está em metros e o eixo dos yy está em Km. A linha a cheio representa a cota dos 600 m)

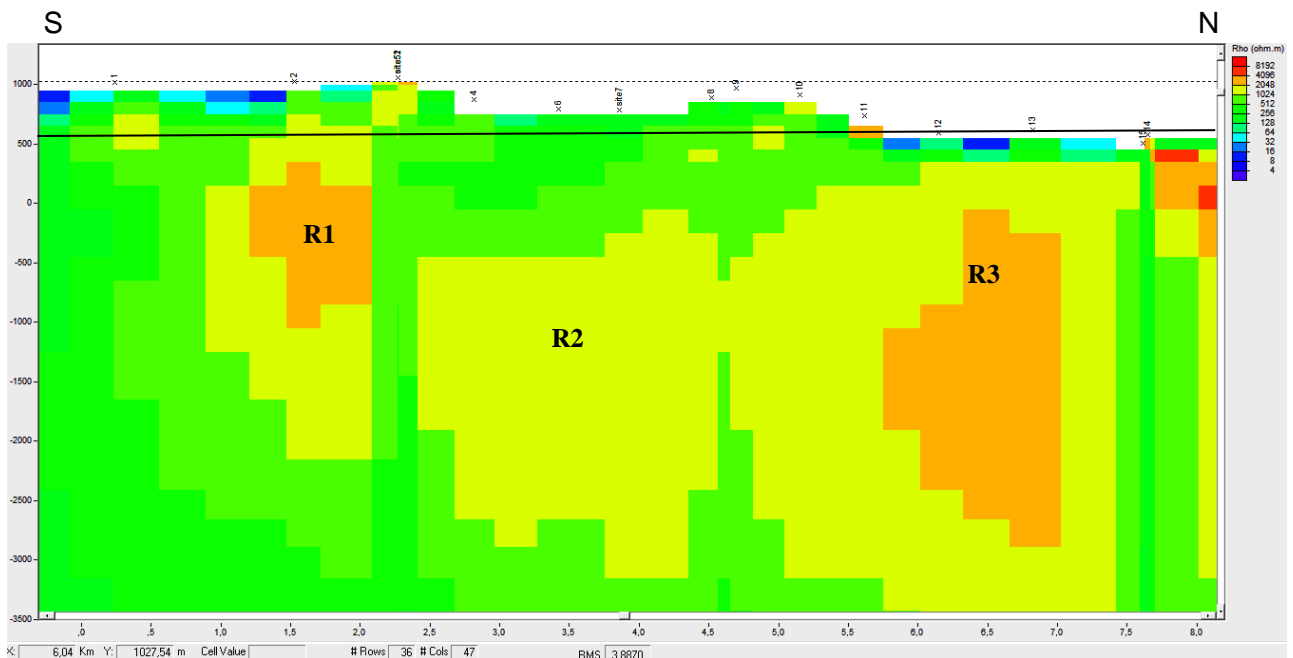


Figura 41 – Modelo 2, obtido por inversão 2D, com erro (RMS) de 3,5. O eixo dos xx está em metros e o eixo dos yy está em Km. A linha a cheio representa a cota dos 600 m)

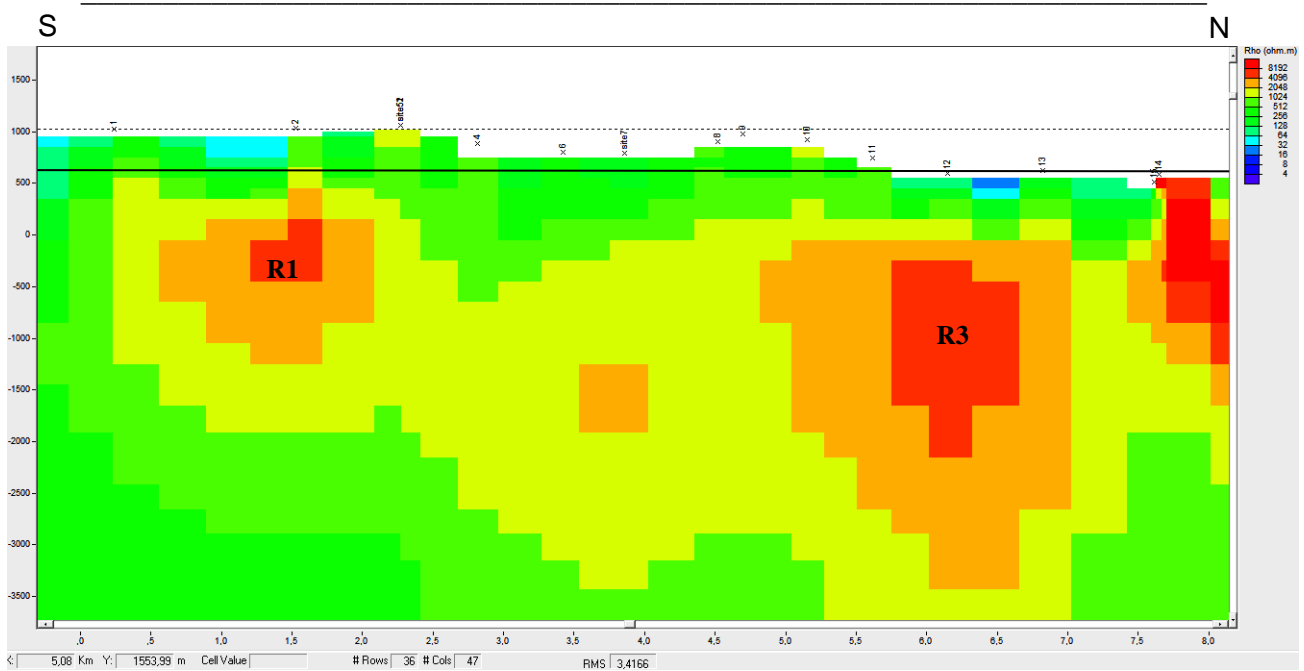


Figura 42 – Modelo 3, obtido por inversão 2D, com erro (RMS) de 3,4. O eixo dos xx está em metros e o eixo dos yy está em Km. A linha a cheio representa a cota dos 600 m)

2.3.1. Análise dos Modelos 2D de resistividade

Relativamente ao modelo 1 de resistividades da figura 40, podemos verificar que existem em profundidade três anomalias resistivas separadas lateralmente (R1, R2 e R3), sendo que R1 tem valores de resistividade superiores às restantes, cerca de 2000 a 3000 Ohm.m, enquanto que, R2 e R3 possuem resistividades de cerca de 1500 Ohm.m. Verificamos que R1 e R2 são menos profundas, iniciando-se entre as cotas dos 500 e dos 0 m, enquanto que R2 se inicia abaixo da cota dos 0 m. Observamos ainda que existe uma descontinuidade lateral menos resistiva, bem marcada, entre as estações 13 e 15.

Relativamente ao modelo 2 de resistividades da figura 41, tal como no modelo anterior, identificam-se as três anomalias resistivas, aproximadamente nas mesmas posições e profundidades. No entanto, neste modelo a R3 tem valores de resistividade maiores (entre 2000 e 3000 Ohm.m), havendo uma continuidade lateral entre esta e a R2. A descontinuidade lateral entre as estações 13 e 15 mantém-se neste modelo.

Por ultimo, no modelo 3 de resistividades da figura 42, as três anomalias resistivas, aparecem ligadas lateralmente entre si, com valores de resistividade acima das dos modelos anteriores (entre 2000 e 4000 Ohm.m), mantendo-se a descontinuidade lateral entre as estações 13 e 15.

Depois de compararmos os três modelos 2D obtidos por inversão, apesar das diferenças encontradas, verificam-se alguns elementos comuns aos três, tais como:

- nos três modelos se salientam três corpos resistivos (R1, R2 e R3), embora as suas formas, limites laterais/verticais e valores de resistividade, variem de modelo para modelo;
- nos três modelos esses corpos resistivos (entre 1024 a 8196 Ohm.m) estão envolvidos em rochas encaixantes com valores de resistividade substancialmente menores (entre 128 e 1024 Ohm.m);
- observa-se, nos três modelos, uma descontinuidade lateral bem marcada, que se prolonga em profundidade, entre as estações 13 e 15, e que parece cortar um corpo resistivo em dois.

Deve ainda, ter-se em atenção que, nos três modelos, as estruturas que aparecem fora das áreas cobertas pelas estações não devem ser consideradas, pois representam estruturas mal condicionadas pelos dados.

2.3.2. Testes de sensibilidade

Sendo o método MT um método de aplicação preferencial na detecção de estruturas condutoras, tendo menor sensibilidade para estruturas resistivas e, atendendo ao facto da resolução de qualquer método electromagnético diminuir em profundidade, efectuaram-se testes de sensibilidade aos três corpos resistivos (R1, R2 e R3), por modelação directa, no sentido de se perceber se estes corpos se encontram bem ou mal resolvidos.

Tendo sido apenas, até aos dias de hoje, intersectada a cúpula greisenizada de uma das intrusões, situada entre as estações 8 e 9, a profundidades de 530 m (debaixo destas estações) e 620 m (entre as duas estações), o modelo 3 é aquele que melhor se adequa a este facto, pois é aquele em que a cúpula greisenizada (a amarelo – resistividades entre os 1024 e 2040 Ohm.m) entre as estações 8 e 9 se aproxima mais destes valores. Como tal, só se efectuaram testes de sensibilidade neste modelo.

Em todos os testes podem-se visualizar as curvas das respectivas estações (resistividade aparente e fase), antes e depois das alterações efectuadas, correspondendo respectivamente às curvas **a** e às curvas **b** (polarização TE a vermelho e polarização TM a azul). Assim, torna-se possível estabelecer uma

comparação entre estas, no sentido de se perceber se o desajuste, entre os dados medidos e modelados, aumenta ou diminui.

Se o desajuste aumentar, das curvas **a** para as curvas **b**, é porque a alteração introduzida no modelo não é coerente com os dados, estando a estrutura condutora melhor resolvida com as suas características originais. Se pelo contrário, o desajuste se manter igual ou diminuir, das curvas **a** para as curvas **b**, é porque a estrutura condutora, com as suas características originais, está mal resolvida pelo modelo, havendo assim, um maior grau de incerteza na interpretação deste.

Nos testes de sensibilidade que se seguem, as características dos corpos condutores que foram alteradas (forma e valores de resistividade), são as que se entendem ser mais pertinentes para discussão.

A- Testes de sensibilidade no corpo R1

1- Testar a resolução do limite superior.

Neste teste aumentou-se o limite superior do corpo R1 para cota dos 650 m, que originalmente, no modelo 3, se apresenta abaixo da cota dos 400 m (em média). Na figura 43 estão representadas as curvas de resistividade aparente e fase da estação mais próxima.

Como se pode observar, o desajuste aumenta significativamente da figura 12a para a 12b, da curva TE de resistividade aparente. Como tal, pode-se concluir que o limite superior do corpo R1 encontra-se bem resolvido pelo modelo 3 original, não devendo ultrapassar a cota dos 500 m.

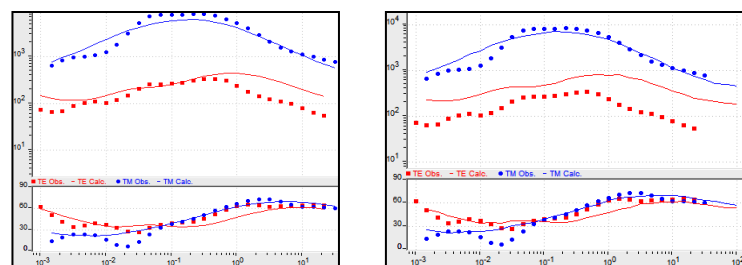


Figura 43 – a - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 2 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação 2 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.

2- Testar a resolução do limite inferior.

Neste teste prolongou-se o limite inferior do corpo R1 até à profundidade de 2200 m, sendo que, no modelo 3, este se apresenta em média aos 1500 m de profundidade. Nas figuras 44 e 45 estão representadas as curvas de resistividade aparente e fase das estações mais próximas.

Como se pode observar, em ambas as estações 2 e 5, há um desfaseamento bastante maior entre a curva de resistividade aparente e os dados medidos, para a polarização TE, depois da alteração. Como tal, pode-se concluir que o limite inferior do corpo R1 não deverá atingir profundidades muito maiores das que se observam no modelo 3.

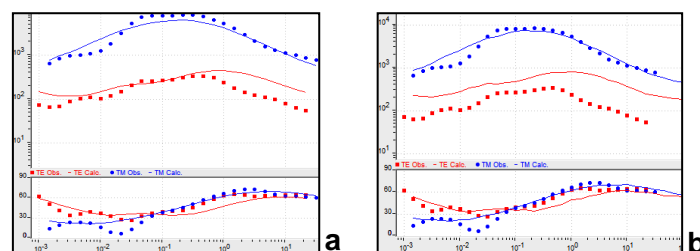


Figura 44 – **a** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 2 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação 2 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.

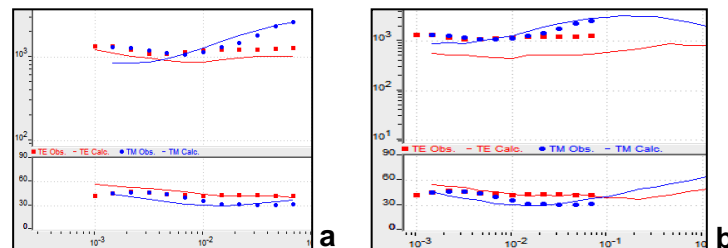


Figura 45 – **a** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 5 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação 5 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.

3- Testar a resolução do limite sul.

Neste teste prolongou-se o limite lateral sul do corpo R1 para sul da estação 1, que no modelo 3 não ultrapassa a localização desta estação. Na figura 46 estão representadas as curvas de resistividade aparente e fase da estação mais próxima.

Como se pode observar, há um desfaseamento bastante maior entre a curva de resistividade aparente e os dados medidos, para a polarização TE, depois da alteração. Como tal, pode-se concluir que o limite sul do corpo R1 não deverá prolongar-se para além da localização da estação 1.

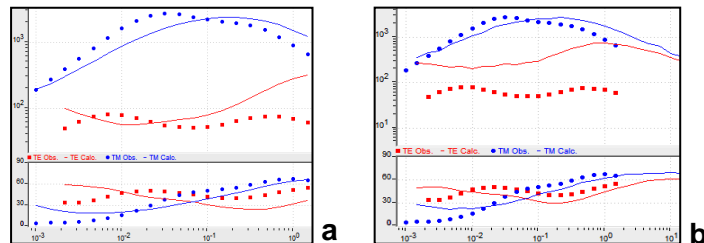


Figura 46 – **a** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 1 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação 1 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.

4- Testar a resolução do limite norte.

Neste teste prolongou-se o limite lateral norte do corpo R1 para junto da estação 5. Nas figuras 47 e 48 estão representadas as curvas de resistividade aparente e fase das estações mais próximas.

Como se pode observar, há um desfaseamento bastante maior entre a curva de resistividade aparente e os dados medidos, para a polarização TE, depois da alteração, para ambas as estações. Como tal, conclui-se que o limite norte do corpo R1 não deverá prolongar-se para além da localização da estação 5, e os seus valores de resistividade neste local, não deverão ultrapassar os que se observam no modelo 3.

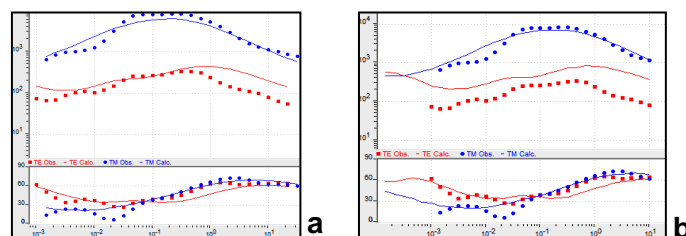


Figura 47 – **a** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 2 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação 2 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.

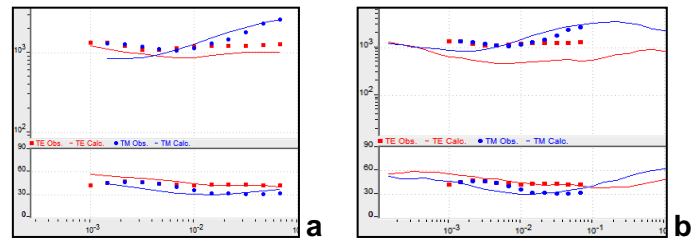


Figura 48 – **a** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 5 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação 5 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.

5- Testar a resolução dos valores de resistividade no centro do corpo.

No modelo 3 o corpo R1 apresenta um núcleo com resistividade aparente de 4096-8192 Ohm.m. Neste teste retirou-se este núcleo mais resistivo, homogeneizando-se a parte central do corpo para valores de resistividades de 2048-4096 Ohm.m. Na figura 49 estão representadas as curvas de resistividade aparente e fase da estação mais próxima.

Como se pode observar, há um desfasamento bastante maior entre a curva de resistividade aparente e os dados medidos, para a polarização TE, depois da alteração, para ambas as estações. Como tal, conclui-se que os valores originais de resistividade, resolvem melhor o centro do corpo R1, no modelo 3.

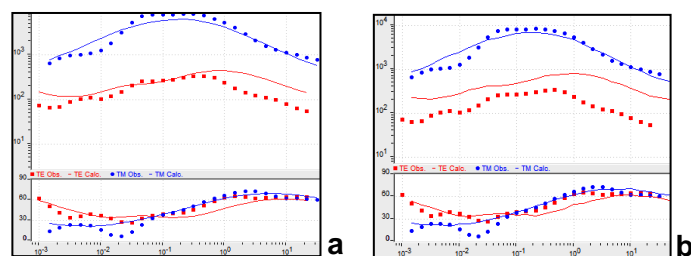


Figura 49 – **a** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 2 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação 2 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.

B- Testes de sensibilidade no corpo R2

1- Testar a existência do núcleo resistivo do corpo.

Neste teste retirou-se o núcleo mais resistivo do corpo R2, com valores de 2048-4096 Ohm.m, homogeneizando-se todo o corpo com resistividades de 1024-2048 Ohm.m. Nas figuras 50 e 51 estão representadas as curvas de resistividade aparente e fase das estações mais próximas.

Embora na estação 6, o aumento do desajuste entre os dados medidos e modelados, seja discreto, este consegue-se observar bastante bem na estação 7, para a polarização TE. Deste modo, conclui-se que a presença de um núcleo resistivo no corpo R2 resolve melhor este, no modelo 3.

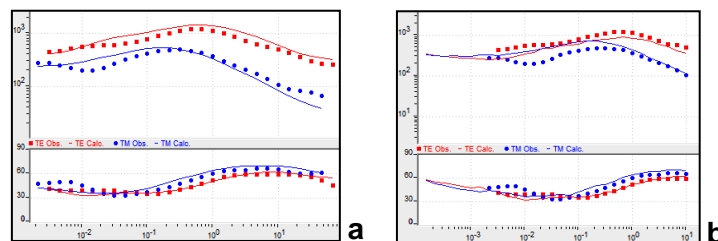


Figura 50 – **a** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 6 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação 6 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.

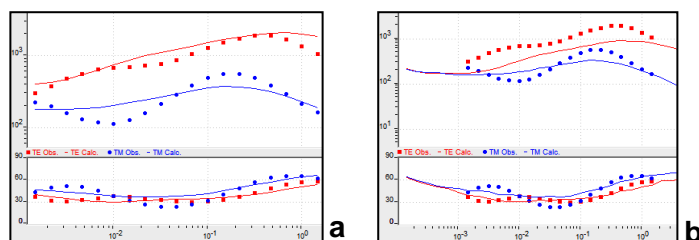


Figura 51 – **a** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 7 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação 7 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.

2- Testar o tamanho do núcleo resistivo conjuntamente com os seus valores de resistividade aparente.

Neste teste aumentou-se o tamanho do núcleo mais resistivo do corpo R2, alterando-se os seus valores de resistividade de 2048-4096 para 4096-8192 Ohm.m. Nas figuras

52 e 53 estão representadas as curvas de resistividade aparente e fase das estações mais próximas.

Em ambas as estações, 6 e 7, verifica-se um desajuste maior entre os dados medidos e os modelados, depois da alteração. No entanto, enquanto que na estação 6 este é menor e mais visível na polarização TM, na estação 7 este é mais evidente, verificando-se apenas para a polarização TE. Assim, é válido concluir que este núcleo deverá ser pequeno e com valores de resistividade mais próximos dos valores iniciais.

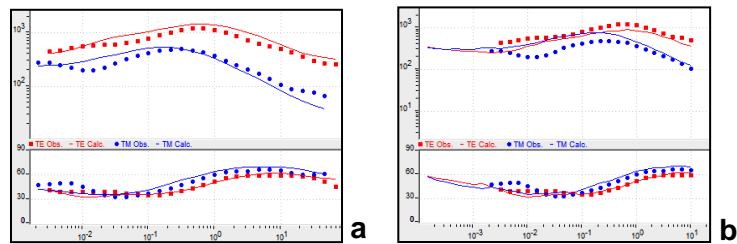


Figura 52 – **a** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 6 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação 6 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.

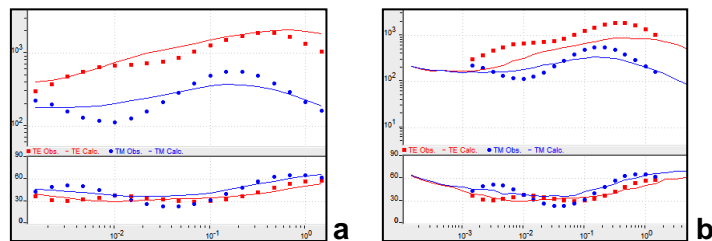


Figura 53 – **a** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 7 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação 7 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.

3- Testar o limite superior do corpo.

Neste teste aumentou-se o limite superior do corpo R2 para cota dos 150 m, uma vez que no modelo 3 este apresenta-se, em média, a uma profundidade de 250 m. Nas figuras 54, 55 e 56 estão representadas as curvas de resistividade aparente e fase das estações mais próximas.

Embora fosse espectável observar na estação 4 um aumento considerável do desajuste, visto a alteração efectuada na forma do corpo estar mais próxima desta estação, este não se verifica. Esta situação pode justificar-se devido ao facto do

contraste de resistividades entre o corpo e o encaixante ser mínimo. Já nas estações 6 e 7 o aumento do desajuste, entre dados medidos e modelados é visível, ainda que menor na estação 6 e apenas na polarização TM. Já na estação 7 o desajuste é mais acentuado na polarização TE. Desta forma, pode-se concluir que é pouco provável que o corpo resistivo R2 seja mais superficial do que está representado no modelo 3.

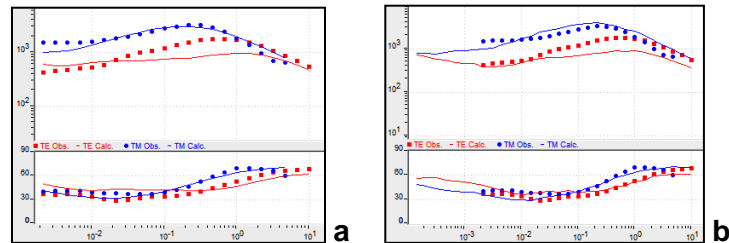


Figura 54 – **a** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 4 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação 4 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.

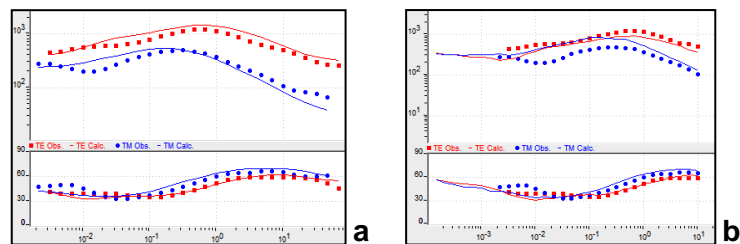


Figura 55 – **a** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 6 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação 6 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.

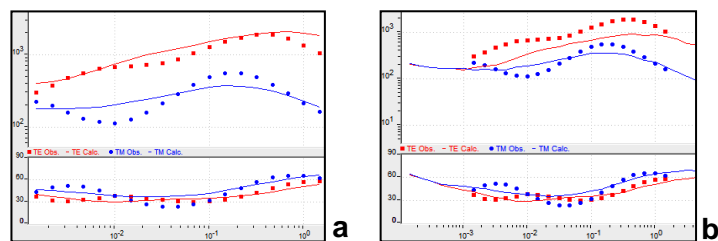


Figura 56 – **a** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 7 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação 7 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.

C- Testes de sensibilidade no corpo R3

1- Testar os limites, superior e lateral sul, do corpo.

Neste teste aumentou-se o limite superior do corpo R3 para cota dos 350 m e prolongou-se a resistividade lateralmente para sul, de uma forma regular em profundidade. Nas figuras 57, 58 e 59 estão representadas as curvas de resistividade aparente e fase das estações mais próximas.

Nas estações 10 e 12, não se observam alterações no desajuste entre os dados medidos e modelados, após as alterações efectuadas ao corpo R3. Contudo, na estação 11, o desajuste aumenta um pouco na curva de resistividade aparente, na polarização TE. Conclui-se, deste modo, que os limites, superior e lateral sul, do corpo R3 poderão estar mal resolvidos pelo modelo 3.

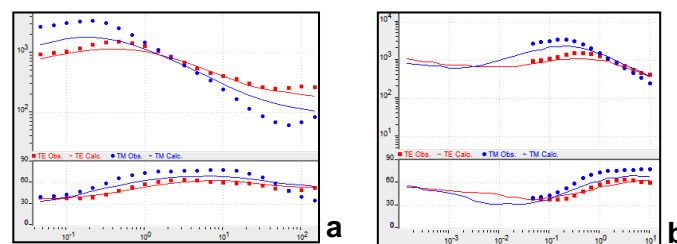


Figura 57 – a - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 10 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação 10 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.

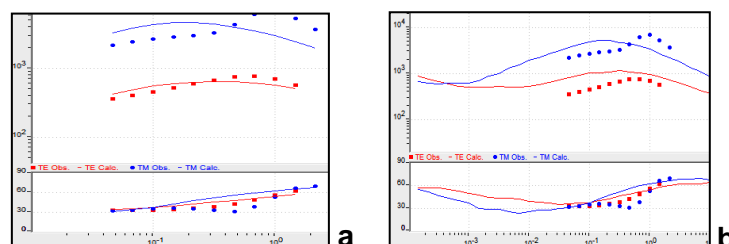


Figura 58 – a - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 11 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação 11 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.

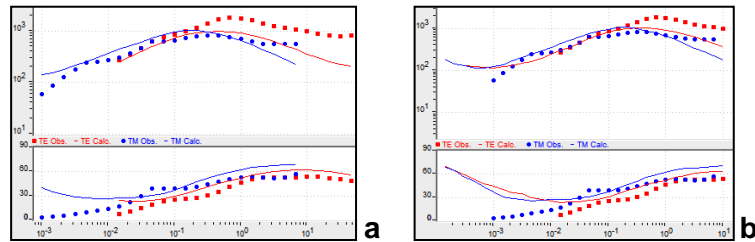


Figura 59 – **a** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 12 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação 12 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.

2- Testar o valor de resistividade no limite norte do corpo.

Neste teste prolongou-se para norte o corpo R3, retirando-se o contraste lateral visível tanto no modelo 3 como nos modelos anteriores, testando-se assim, tanto a resolução do limite lateral norte do modelo como a existência do contraste lateral verificado no modelo 3 entre as estações 13 e 14. Nas figuras 60, 61 e 62 estão representadas as curvas de resistividade aparente e fase das estações mais próximas.

Nas três estações estudadas (13, 14 e 15) não se observam alterações significativas nos desajustes das respectivas curvas. Deste modo, o limite norte do corpo R3 poderá estar mal resolvido no modelo 3, tal como os valores de resistividade do contraste lateral.

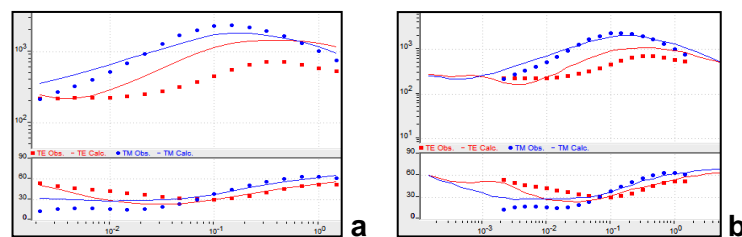


Figura 60 – **a** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 13 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação 13 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.

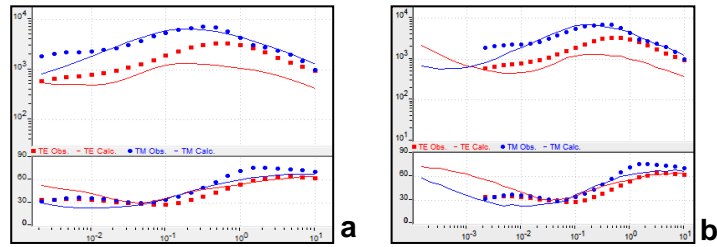


Figura 61 – **a** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 14 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação 14 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.

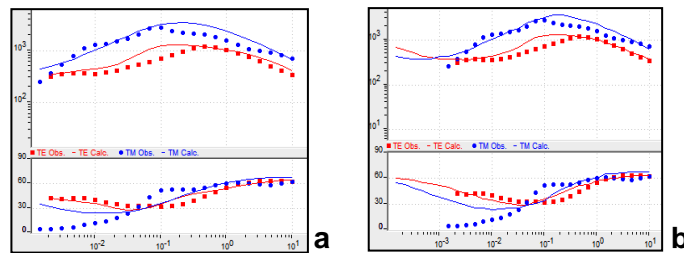


Figura 62 – **a** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 15 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação 15 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.

3- Testar o limite inferior do corpo.

Neste teste diminuiu-se a profundidade do corpo R3 para os 2650 m, sendo que no modelo 3 este ultrapassa os 3500 m de profundidade. Nas figuras 63, 64 e 65 estão representadas as curvas de resistividade aparente e fase das estações mais próximas. Embora na estação 12 o desfasamento não tenha aumentado, na estação 11 a curva da polarização TE, de resistividade aparente, apresenta um desfasamento bastante mais elevado depois da alteração. A curva da polarização TE da fase, da estação 13 apresenta, embora de uma forma bastante subtil, um desajuste maior após a alteração. Como tal, conclui-se que o limite inferior do corpo R3 atingirá profundidades superiores a 2650 m, como se observa no modelo 3.

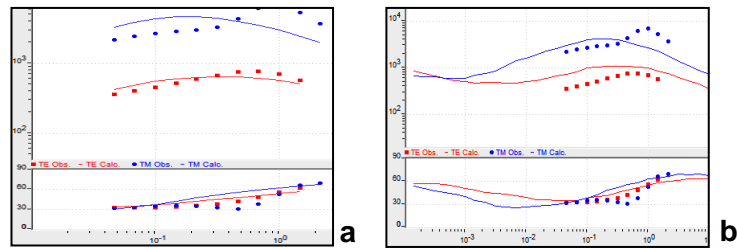


Figura 63 – **a** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 11 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação 11 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.

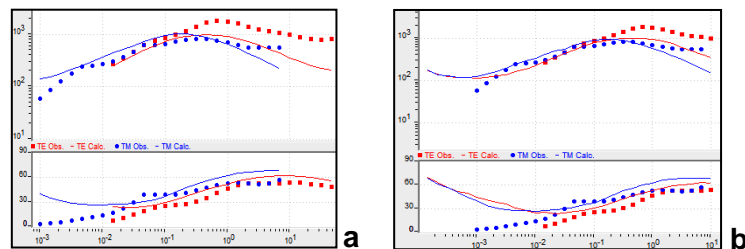


Figura 64 – **a** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 12 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação 12 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.

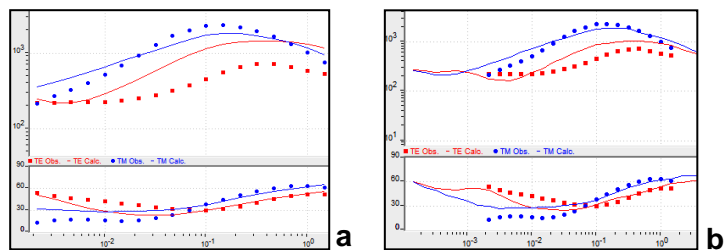


Figura 65 – **a** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 13 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação 13 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.

4- Testar os valores de resistividade da parte central do corpo.

Neste teste retirou-se a parte central, mais resistiva (resistividades de 4096-8192 Ohm.m) do corpo R3, homogeneizando-se os valores de resistividades de todo o corpo para 2048-4096 Ohm.m. Nas figuras 66, 67 e 68 estão representadas as curvas de resistividade aparente e fase das estações mais próximas.

Os resultados deste teste revelam-se muito semelhantes aos obtidos no teste anterior. Na estação 12 o desfasamento não aumentou e nas estações 11 e 13 verifica-se um aumento de desfasamento nas curvas da polarização TE de resistividade aparente e fase, ainda que este seja mais acentuado na estação 11. Como tal, conclui-se que o centro do corpo R3 deverá ser mais resistivo do que 4096 Ohm.m, tal como se observa no modelo 3.

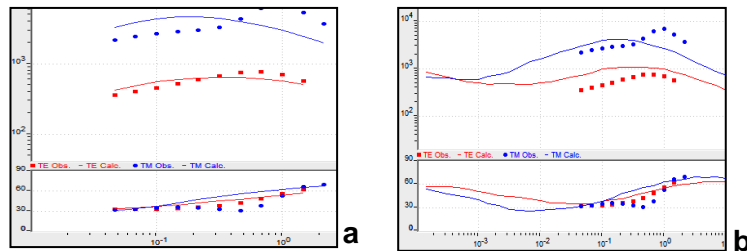


Figura 66 – **a** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 11 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação 11 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.

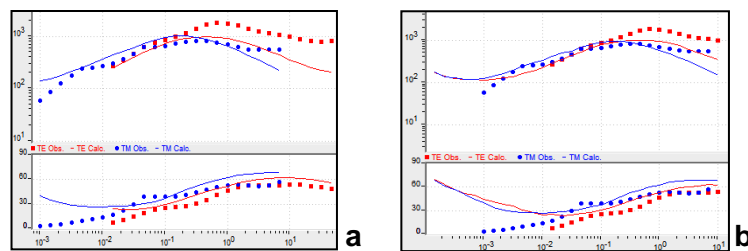


Figura 67 – **a** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 12 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação 12 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.

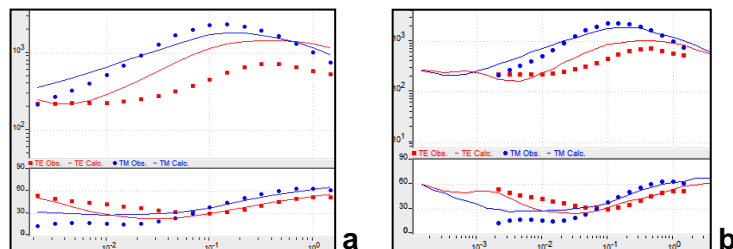


Figura 68 – **a** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus) em baixo, da estação 13 antes do teste de sensibilidade; **b** - Curvas de resistividade aparente (em ohm.m), em cima, e fase (em graus), em baixo, da estação 13 depois do teste de sensibilidade. Os pontos representam os dados medidos e as curvas representam os dados modelados.

Após a análise dos testes de sensibilidade efectuados nos corpos R1, R2 e R3, pode-se constatar que os corpos R1 e R2 encontram-se bem resolvidos pelo modelo 3. Relativamente ao corpo R3, os testes levantam algumas dúvidas relativas aos limites, laterais e superior, que este corpo apresenta.

2.3.3. Discussão/interpretação dos modelos 2D de resistividade

Uma vez que geologicamente, o Couto Mineiro da Panasqueira, é caracterizado pela existência de xistos e grauvaques, que em profundidade se encontram intruídos por corpos graníticos, é possível: relacionar as anomalias resistivas (R1, R2 e R3) com possíveis intrusões graníticas (tons de amarelo a vermelho), que poderão estar lateralmente ligadas entre si ou não, e cujas diferenças de valores de resistividade se podem explicar geologicamente; relacionar as rochas encaixantes menos resistivas, aos xistos e grauvaques (tons esverdeados). Contudo, torna-se difícil precisar a forma, dimensão e valores de resistividade destes corpos, pois estas características variam de modelo para modelo. Há que considerar ainda que os testes de sensibilidade efectuados no modelo 3, no corpo R3, mostram que este corpo se encontra mal resolvido.

Relativamente à descontinuidade lateral menos resistiva, que é constante nos três modelos, entre as estações 13 e 15, esta pode representar em profundidade o corredor de falha correspondente à Falha da Cebola, que está cartografada nesta zona.

No entanto, como se observa na figura 32, para além da falha da cebola, existem várias falhas que cruzam o perfil em estudo.

Os corredores das falhas 3W, Principal e do Masso, que cruzam o perfil a norte da estação 7, antes da estação 8, estão bem representados nos modelos, em particular no 1 e no 2. A falha das Lameiras também cruza o perfil a norte da estação 5, muito perto desta. O seu efeito consegue-se visualizar bastante bem nos modelos, em particularmente também no 1 e no 2, devido ao contraste lateral que provoca em profundidade por baixo da estação 5.

Convém referir que no modelo 3 foi feita uma suavização dos dados na inversão, ao se usarem as curvas ajustadas. Na prática isto corresponde a uma filtragem de dados de modo a eliminar as variações mais bruscas, pelo que, naturalmente, as falhas ficam menos visíveis.

Neste último modelo, pode-se assumir que a forma da margem norte do corpo intrusivo R1, deve-se à existência da Falha das Lameiras.

Tendo em conta os resultados dos testes de sensibilidade efectuados, pode-se concluir que o grau de certeza, relativamente à localização do corredor de falha, correspondente à Falha da cebola no modelo 3, é baixo (teste C-2). Contudo, o grau de certeza aumenta um pouco, uma vez que este corredor de falha, aparece nos modelos 1 e 2, com uma localização muito semelhante. O grau de certeza da localização dos restantes corredores de falhas é bastante elevado, uma vez que é visível nos mesmos locais, em todos os modelos, e também se encontram bem resolvidos pelo modelo 3.

Como já se referido anteriormente, o modelo 3 é aquele que se melhor se adequa ao posicionamento, em profundidade, da única cúpula de greisen intersectada até hoje, pelos trabalhos mineiros. O facto de esta cúpula não aparecer nos modelos, inclusive no modelo 3, às cotas interceptadas pelos trabalhos mineiros, pode dever-se ao reduzido número de sondagens na área e às aproximações realizadas, ou ao fraco contraste de resistividade dessa estrutura com o encaixante.

Na figura 69 está representado o modelo 3 contendo os três corredores de falhas, acima identificados.

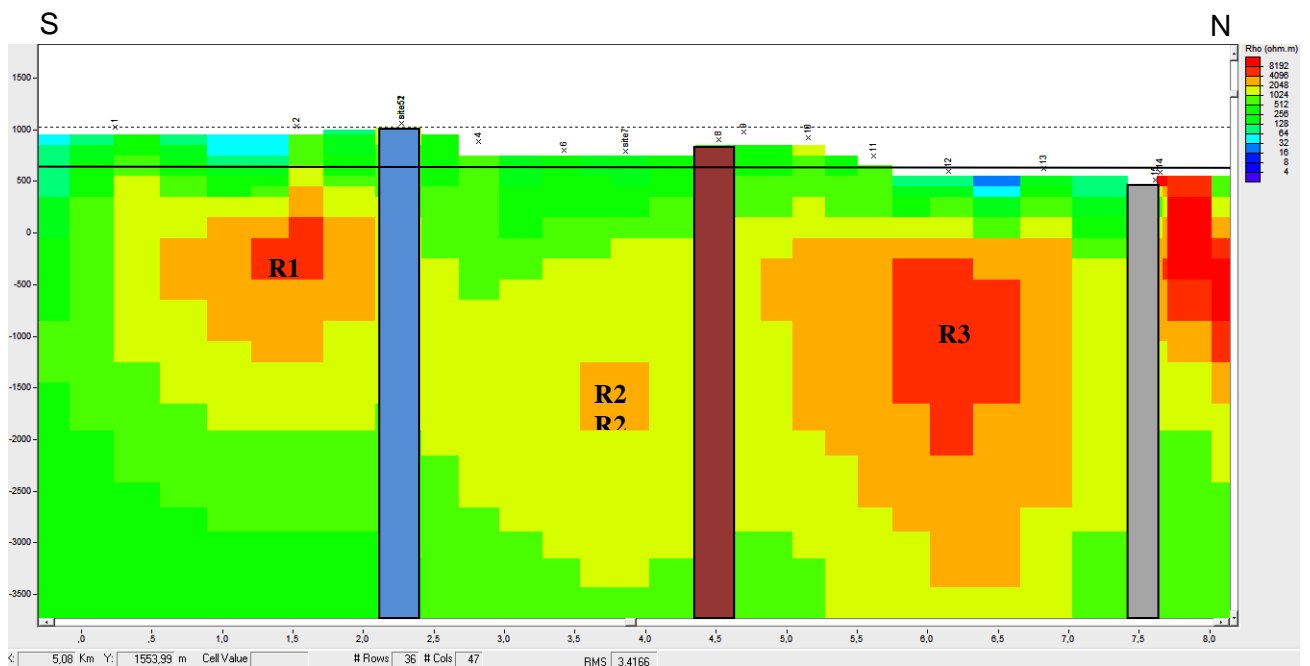


Figura 69 – Modelo 3, obtido por inversão 2D, incorporando os corredores das falhas que intersectam o perfil Inicial. Da esquerda para a direita, respectivamente: Falha das Lameiras (a azul); Falhas 3W, Principal e do Masso (a cor-de-vinho); Falha da Cebola (a cinzento). A linha a cheio representa a cota dos 600 m.

No modelo 3 observa-se a existência de continuidade lateral entre os corpos graníticos (R1, R2 e R3), sugerindo tratar-se de um único corpo intrusivo, que pela geometria apresentada, poderá denominar-se como um batólito. Como se pode observar no próprio modelo e, atendendo aos resultados obtidos pelos testes de sensibilidade efectuados, que sugerem que R3 atinge profundidades bem maiores que R1 ou R2, o pedúnculo deste batólito poderá localizar-se neste local.

Ainda considerando esta hipótese, verifica-se que este batólito possui um limite superior algo irregular, devido à depressão que apresenta na zona R2. Esta depressão é suportada pelos testes de sensibilidade efectuados a R2 e, poderá ter-se originado pela movimentação dos dois corredores de falhas que delimitam esta zona (corredor de falha azul e corredor de falha cor-de-vinho), levando ao abatimento da mesma.

Pode observar-se também que esta zona do batólito é a que possui valores de resistividade aparente menos elevados. Esta diminuição da resistividade aparente deverá relacionar-se também, com existência destes dois corredores de falha, pois estes terão possibilitado e/ou aumentado a circulação de fluidos nesta zona, que como tal, terá sido sujeita a uma alteração hidrotermal bastante acentuada, modificando a sua composição mineralógica original e tornando-a menos resistiva.

No modelo 3 observam-se contrastes laterais e verticais de resistividade aparente, bastante mais acentuados do que nos modelos 1 e 2. Considerando ainda a hipótese que se tratar apenas de um único corpo intrusivo, estes contrastes originam um zonamento bem marcado no mesmo modelo. Como os contrastes de resistividade das rochas estão associados a variações de certas propriedades físicas e químicas e, tendo em conta as características geológicas do couro Mineiro da Panasqueira, para o zonamento do corpo intrusivo observado no modelo 3, podem-se considerar as seguintes hipóteses explicativas:

- 1- a existência de diferentes fácies laterais no corpo granítico, resultante dos processos de diferenciação magmática;
- 2- a ocorrência de hidrotermalismo nos granitos resultantes deste corpo intrusivo.

Analisando a hipótese 1, a existência de diferentes fácies no corpo granítico, pressupõe a existência de zonas com composições mineralógicas diferentes. Este zonamento poderá explicar-se através dos fenómenos de diferenciação magmática que ocorrem durante o processo de consolidação/arrefecimento do magma, como por exemplo, a cristalização fraccionada e a diferenciação gravítica.

Estes processos podem estar na origem de zonamentos, não só mineralógicos mas também texturais, que sendo intrínsecos à formação do próprio granito, fazem variar a

condutividade eléctrica neste. Em conformidade com esta hipótese estão os dados das tabelas 4 e 5 do ponto 1 do capítulo 2, nas quais podemos observar que cada tipo de rocha não tem apenas um valor de resistividade associado, mas sim um intervalo considerável de valores de resistividade. Podemos ver o caso concreto do granito porfírico, cujos valores de resistividade aparente variam entre os $4,4 \times 10^3$ Ohm.m e os $1,3 \times 10^6$ Ohm.m (Telford *et al*, 1990).

Relativamente à hipótese 2 considera-se que, o facto deste corpo granítico se apresentar cortado por vários corredores de falha, terá propiciado uma intensa circulação de fluidos, conseqüentemente levando à alteração hidrotermal do próprio granito (greisenização). Como referido anteriormente, o processo de greisenização do granito da Panasqueira é caracterizada por uma associação mineral dominada por quartzo, albite e moscovite, com alguma apatite, volframite, arsenopirite, cassiterite, calcopirite, pirite, pirrotite e esfalerite. Neste leque encontram-se minerais mais resistivos do que outros, sendo que os sulfuretos (arsenopirite, calcopirite, pirite e pirrotite) são mais condutores que os restantes minerais (quartzo, albite, moscovite, etc.) (para se comparar valores de resistividades entre minerais, consultar tabelas 2 e 3 do ponto 1 do capítulo 2). A variação percentual e espacial destes minerais pode estar na origem dos contrastes de resistividade que se observam no corpo intrusivo do modelo 3.

Considerando os modelos 1 e 2, que sugerem antes a existência de três corpos intrusivos mais pequenos (R1, R2, R3), sem ligação entre si, os contrastes laterais e verticais de resistividade podem-se explicar, através do fenómeno de metamorfismo de contacto que as rochas encaixantes, xistos e grauvaques, sofreram com a instalação das intrusões. Assim sendo, as zonas a cor-de-laranja e vermelho poderão corresponder aos granitos, as zonas amarelas poderão corresponder às auréolas de metamorfismo de contacto e as zonas a verde poderão corresponder a xistos e grauvaques não metamorfizados.

De forma geral, pode-se considerar que os modelos obtidos, apesar das diferenças observadas, correspondem ao que seria esperado encontrar em profundidade, neste perfil. No couro mineiro da Panasqueira sempre se suspeitou da existência de mais do que uma intrusão magmática, para além daquela cuja cúpula greisenizada é conhecida. Kelly e Rye (1979) referem no seu estudo sobre a Panasqueira, que a perfuração dos flancos mais profundos da cúpula sugere a presença de outras apófises semelhantes, que deverão estar ligadas em profundidade a uma massa intrusiva mais extensa. Estes autores consideram ainda, como já referido no capítulo

1, que a área de xistos mosqueados (xistos alterados por metamorfismo de contacto) é demasiado extensa para ter sido provocada apenas pela instalação da única cúpula conhecida.

Como esta cúpula conhecida aparece nos modelos com uma assinatura bastante resistiva (R2), é de supor que os restantes corpos resistivos que se observam em profundidade, com uma assinatura geoeléctrica semelhante, possam corresponder igualmente a outras intrusões magmáticas, ou ao prolongamento lateral da intrusão que se conhece. Sendo assim, as zonas R1 e R3, são zonas de particular interesse para prospecção, tornando-se útil a realização de mais sondagens MT nas mesmas, que permitirão a elaboração de modelos 3D, com vista a uma melhor caracterização das estruturas condutoras, em profundidade.

3. Zona Sul (modelo 3D)

3.1. Aquisição de dados da malha 3D

A segunda fase da campanha de prospecção MT englobou a elaboração de duas malhas 3D e a aquisição de dados nas mesmas (Zona Sul e Zona Norte). Estas duas zonas foram seleccionadas com base no levantamento anterior, como sendo áreas de potencial interesse, localizando-se por cima e em redor dos corpos resistivos R1 (Zona Sul) e R3 (Zona Norte) dos modelos do perfil inicial. Neste trabalho apenas se irão analisar os dados relativos à Zona Sul.

Na Zona Sul foram efectuadas 19 sondagens MT, com um arranjo aproximadamente quadrangular, em que as estações distam entre si cerca de 500 m, como se observa na figura 70.



Figura 70 – Localização das estações de MT da Zona Sul (assinaladas com bandeiras). As estações assinaladas com balões vermelhos são as estações do perfil inicial que se incluíram na Zona Sul. Imagem do Google Earth

Tal como no levantamento anterior, a localização das estações também foi condicionada por constrangimentos geográficos: topografia irregular, vegetação densa, e a proximidade de linhas de média e alta tensão. Deste modo, das 23 estações inicialmente previstas para a Zona Sul, realizaram-se apenas 19.

Os dados desta segunda fase da campanha de prospecção, tal como os do Perfil Inicial, encontram-se afectados por ruído electromagnético, sendo na sua maioria provocado pela actividade da mina, havendo como tal, variações na qualidade destes. No processamento dos dados foram incluídas 23 sondagens MT, 19 destas efectuadas na segunda fase da campanha e as restantes 4, efectuadas no levantamento do Perfil Inicial.

As 19 estações efectuadas na Zona Sul foram adquiridas com equipamentos de magnetotelúrica Metronix ADU06, do Centro de Geofísica da Universidade de Lisboa e Metronix ADU07, da Universidade de Barcelona. A banda de frequências medidas foi aproximadamente desde os 0,5 Hz até aos 1400 Hz, nas ADU07 (inclui a medição das bandas HF e LF2/Free) e 0,3 Hz até aos 1200 Hz, nas ADU06 (inclui a medição das bandas LF1 e LF2/Free). Em cada estação foram adquiridas as componentes horizontais dos campos eléctricos e magnéticos, segundo as direcções Norte-Sul (eixo X) e Este-Oeste (eixo Y).

3.2. Análise preliminar dos dados

Após a aquisição das séries temporais das componentes horizontais dos campos eléctricos e magnéticos, para as várias gamas de frequências medidas, procedeu-se à sua inspecção visual de modo a retirarem-se os segmentos de ruído mais significativos. Também nestas sondagens, o ruído revelou-se bem marcado nas frequências mais altas (> 1000 Hz).

Nas figuras 71, 72 e 73 podemos observar segmentos de séries temporais, para ambos os canais eléctricos e magnéticos, das várias bandas de frequências medidas: HF, LF1, LF2. Nesta campanha, nas estações que foram adquiridas pelas ADU07, foi medida uma HF (high frequency), cuja gama de frequências é aproximadamente igual à banda LF1 das ADU06. A LF3 não foi incluída no processamento, uma vez que esta se revelou bastante afectada por ruído, como já se tinha verificado nas sondagens do perfil inicial e, também porque as profundidades a que nos dá acesso na obtenção dos modelos (superiores a 2000 m, aproximadamente), ultrapassam a profundidade de interesse para este estudo.

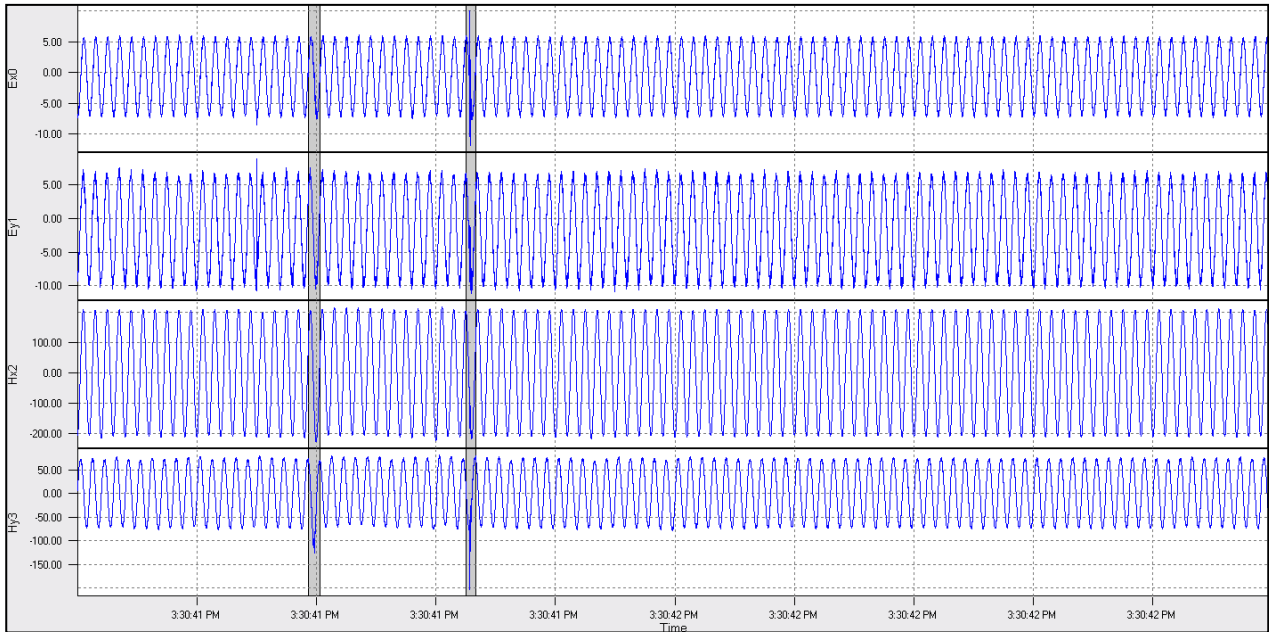


Figura 71 – Exemplo de um segmento de série temporal da banda HF (altas frequências – ADU07) para os canais eléctricos e magnéticos (Ex, Ey, Hx, Hy). O eixo dos yy corresponde à amplitude em mv e o eixo dos xx corresponde ao tempo em horas. Os segmentos a sombreado correspondem a segmentos de ruído retirados.

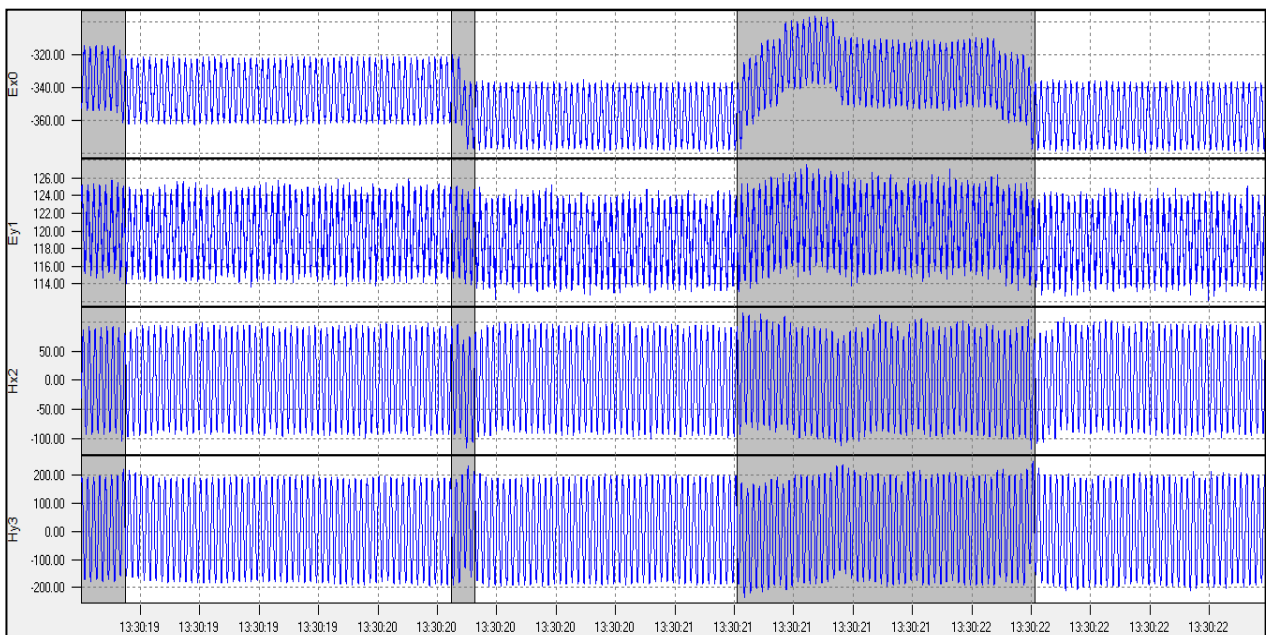


Figura 72 – Exemplo de um segmento de série temporal da banda LF1 (altas frequências – ADU06) para os canais eléctricos e magnéticos (Ex, Ey, Hx, Hy). O eixo dos yy corresponde à amplitude em mv e o eixo dos xx corresponde ao tempo em horas. Os segmentos a sombreado correspondem a segmentos de ruído retirados.

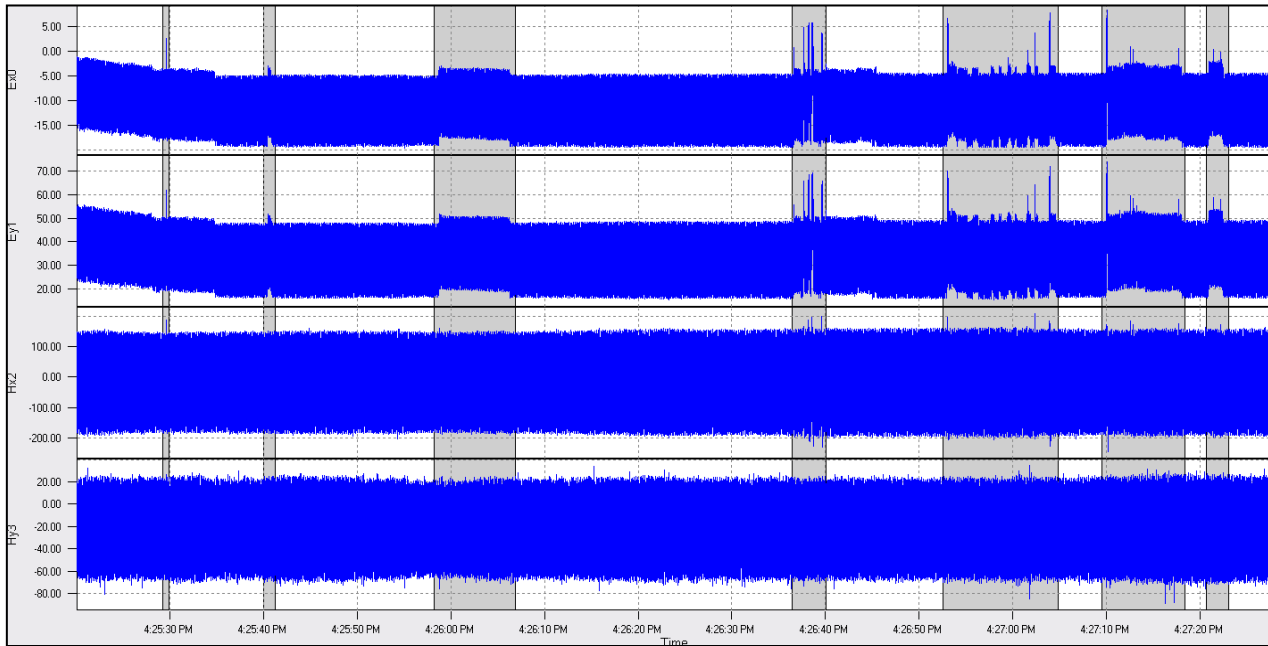


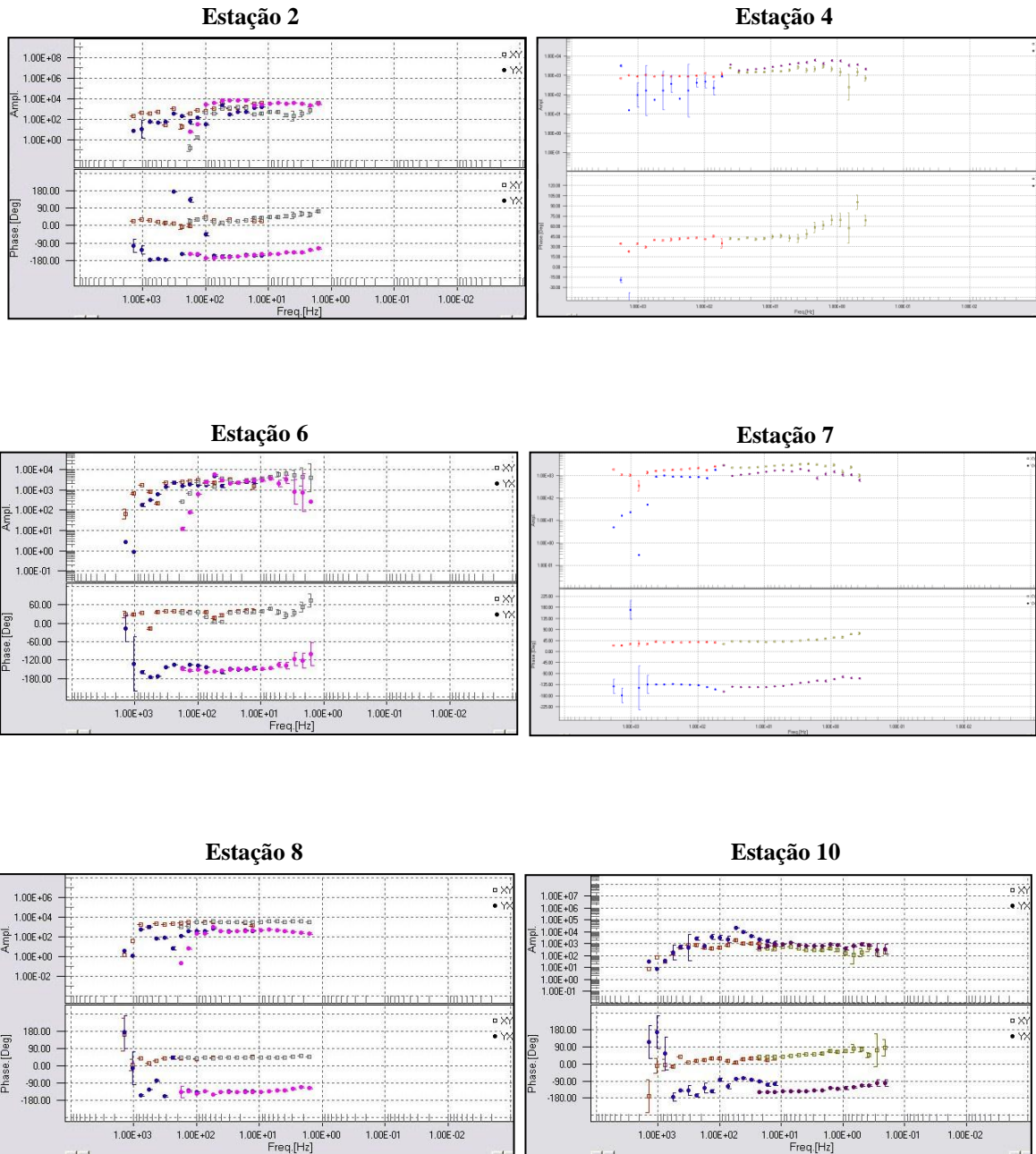
Figura 73 – Exemplo de um segmento de série temporal da banda LF2 (médias frequências) para os canais eléctricos e magnéticos (Ex, Ey, Hx, Hy). O eixo dos yy corresponde à amplitude em mv e o eixo dos xx corresponde ao tempo em horas. Os segmentos a sombreado correspondem a segmentos de ruído retirados.

Tabela 8 – Tabela das gamas de frequências, com os respectivos valores em Hertz, medidas nas ADU06 e ADU07

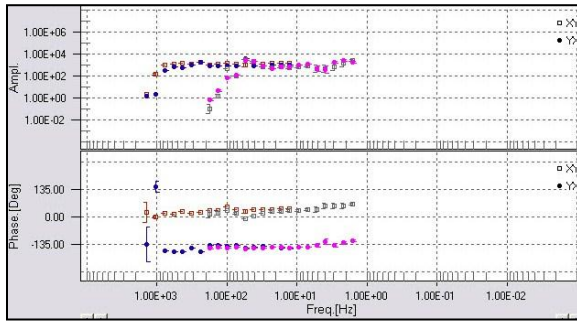
ADU06		ADU07	
Bandas de frequências medidas	Intervalos correspondentes em Hz	Bandas de frequências medidas	Intervalos correspondentes em Hz
LF2/Free	0,3-40 (aproximadamente)	LF2/Free	0,5-70 (Aproximadamente)
LF1	20-1200 (aproximadamente)	HF	70 -1400 (Aproximadamente)

As séries temporais da Zona Sul são muito semelhantes às do perfil inicial, que de um modo geral, também se encontram afectadas por ruído, como se constata pela observação das figuras acima. No entanto, pela análise das 3 bandas de frequências representadas (HF, LF1 e LF2), constata-se que o ruído é mais significativo nas bandas de frequências mais baixas (LF2), sendo que as altas frequências adquiridas pela ADU06 (LF1) possuem um pouco mais de ruído do que as adquiridas pela ADU07 (HF).

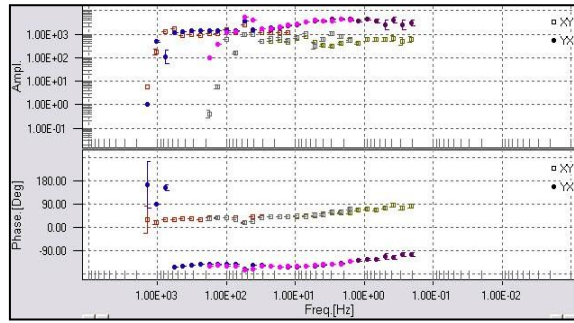
Após a análise do ruído das séries temporais, estas foram processadas, aplicando-se métodos robustos, referenciados no ponto 4 do capítulo 2, de modo a obterem-se, para cada uma das estações, os tensores de impedâncias e as respectivas curvas de resistividade aparente e fase, como se pode observar nos gráficos da figura 74.



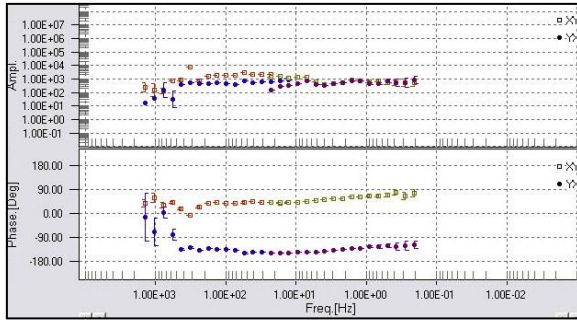
Estação 11



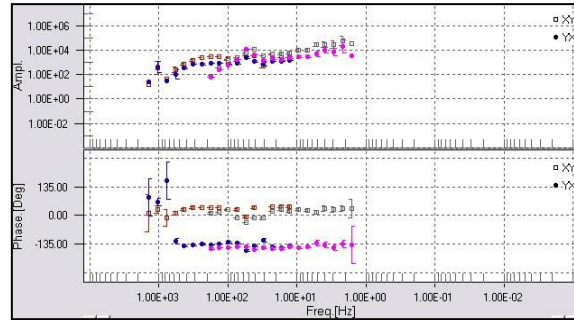
Estação 12



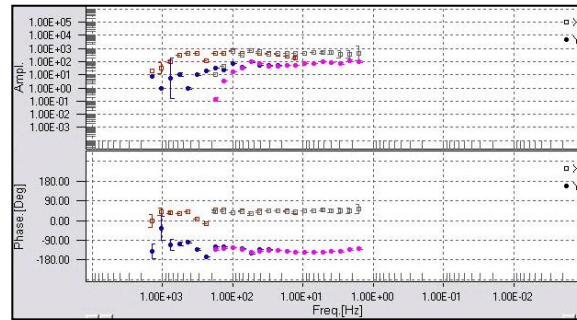
Estação 13



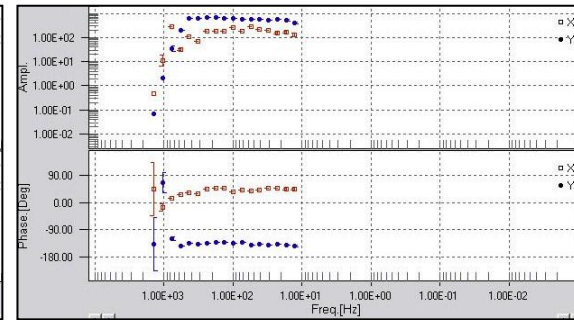
Estação 14



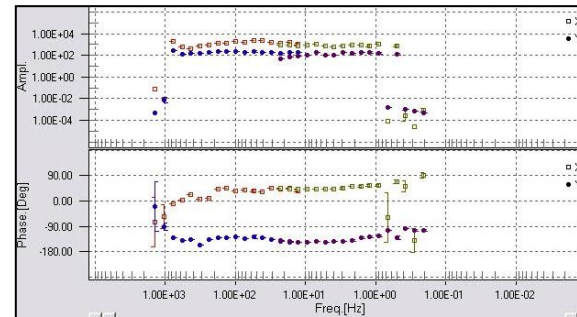
Estação 15



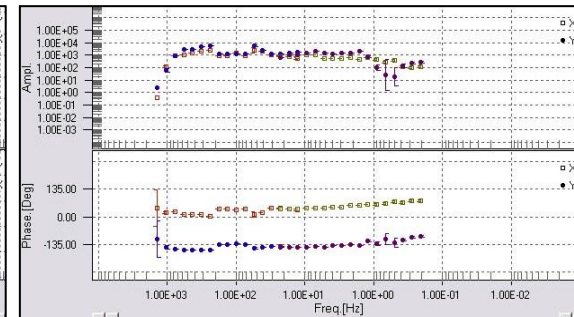
Estação 16 – LF1



Estação 17



Estação 19



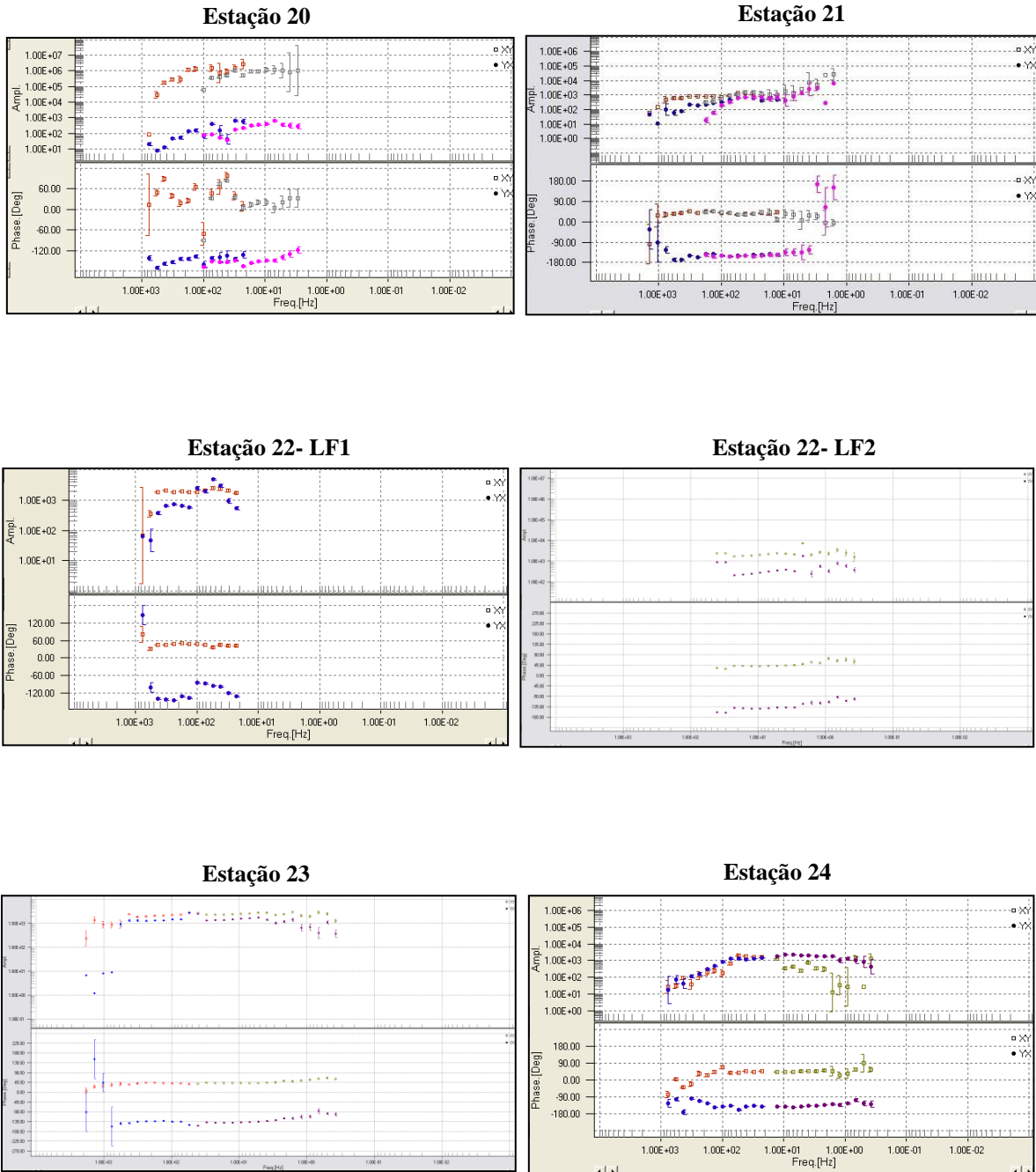


Figura 74 – Curvas de resistividade aparente (curva da Ampl em ohm.m) e fase (curva da Phase) das 19 estações da Zona Sul.

Embora as séries temporais revelem mais ruído nas bandas de baixas frequências, após interpretação das curvas de resistividade aparente e fase da figura 74, verifica-se que o ruído afecta, na maioria das estações, as curvas correspondente às altas frequências. Deste modo, as curvas correspondentes às frequências HF/LF1 possuem maior quantidade de pontos problemáticos, do que as frequências mais baixas (LF2), principalmente acima dos 1000 Hz, como já referido anteriormente. Este facto é facilmente observável nas estações 2, 4, 8, 10, 12, 13 e 15.

Contrariamente a esta tendência, nas estações 20 e 24 a curva correspondente à banda LF2 possui maior quantidade de pontos problemáticos do que da banda HF/LF1.

Observamos, no entanto, algumas estações com uma qualidade dados de bastante satisfatória, em que as curvas de ambas as gamas de frequências são bastante coerentes, são estas as estações 7, 10, 13, 14, 17, 19 e 23. Estas curvas, como se pode observar, estão mais alinhadas e revelam poucos pontos problemáticos, quando comparadas com as restantes, ainda que acima dos 1000 Hz se observe sempre algum ruído.

Usando o mesmo critério pode-se classificar as curvas das estações 6 e 20 como sendo de baixa qualidade, pois possuem ruído acentuado em ambas as gamas de frequências.

Tal como nas estações do Perfil Inicial, as estações da Zona Sul possuem curvas de resistividade aparente, com amplitudes que não oscilam muito do valor 1000 Ohm.m. Sendo este valor médio já observado nas curvas do perfil inicial, é ainda mais consistente afirmar que as curvas da Zona Sul, não se encontram afectadas por “static Shift”. A estação 20 constitui uma excepção, em que ambas as curvas, xy e yx, parecem encontrar-se “shiftadas”, pois encontram-se bastante longe deste valor médio.

Após remoção dos pontos problemáticos das curvas de resistividade aparente e fase, procedeu-se à inversão 3D dos dados, adicionando às 19 estações da Zona Sul, as estações 1, 2, 4 e 5 do Perfil Inicial.

3.3. Modelo 3D obtido por inversão

A inversão que originou o modelo 3D da Zona Sul foi efectuada conjuntamente para os valores de resistividade aparente e fase das 23 estações consideradas, para ambas as polarizações TE (polarização E) e TM (polarização B), com um erro inferior a 15%

A elaboração de um modelo 3D na zona da Panasqueira é particularmente difícil devido a dois factores: o intenso ruído electromagnético que se verificou em algumas estações e a topografia bastante irregular. Relativamente ao ruído electromagnético, este pode introduzir nos modelos alguma ambiguidade e imprecisão, no entanto como este é causado pela actividade humana e, nesta zona mais propriamente deve-se sobretudo à actividade mineira, não havendo forma de se evitar a contaminação dos dados adquiridos no campo. Relativamente à topografia, a sua introdução no modelo 3D de uma forma realista, leva a que se ultrapassassem os limites da capacidade de cálculo computacional, no entanto, a sua introdução no modelo 3D de uma forma menos realista, conduziria a erros numéricos significativos. Deste modo, efectuando-se um compromisso entre a capacidade de cálculo, por parte do software e a obtenção de erros numéricos pouco significativos, optou-se por não se considerar a topografia da Zona Sul, na obtenção do modelo. Assim, os resultados serão apresentados em termos de profundidade e o cálculo da cota de cada secção horizontal do modelo, efectuou-se utilizando um valor médio de topografia de 910 m.

Tal como nos modelos 2D, as estruturas condutoras ou resistivas que aparecem fora da área coberta pelas estações, não devem ser consideradas, pois apresentam estruturas mal condicionadas pelos dados.

Nas figuras 75 e 76 observam-se cortes horizontais do modelo 3D a profundidades diferentes, obtidos a partir de dois programas distintos de visualização tridimensional.

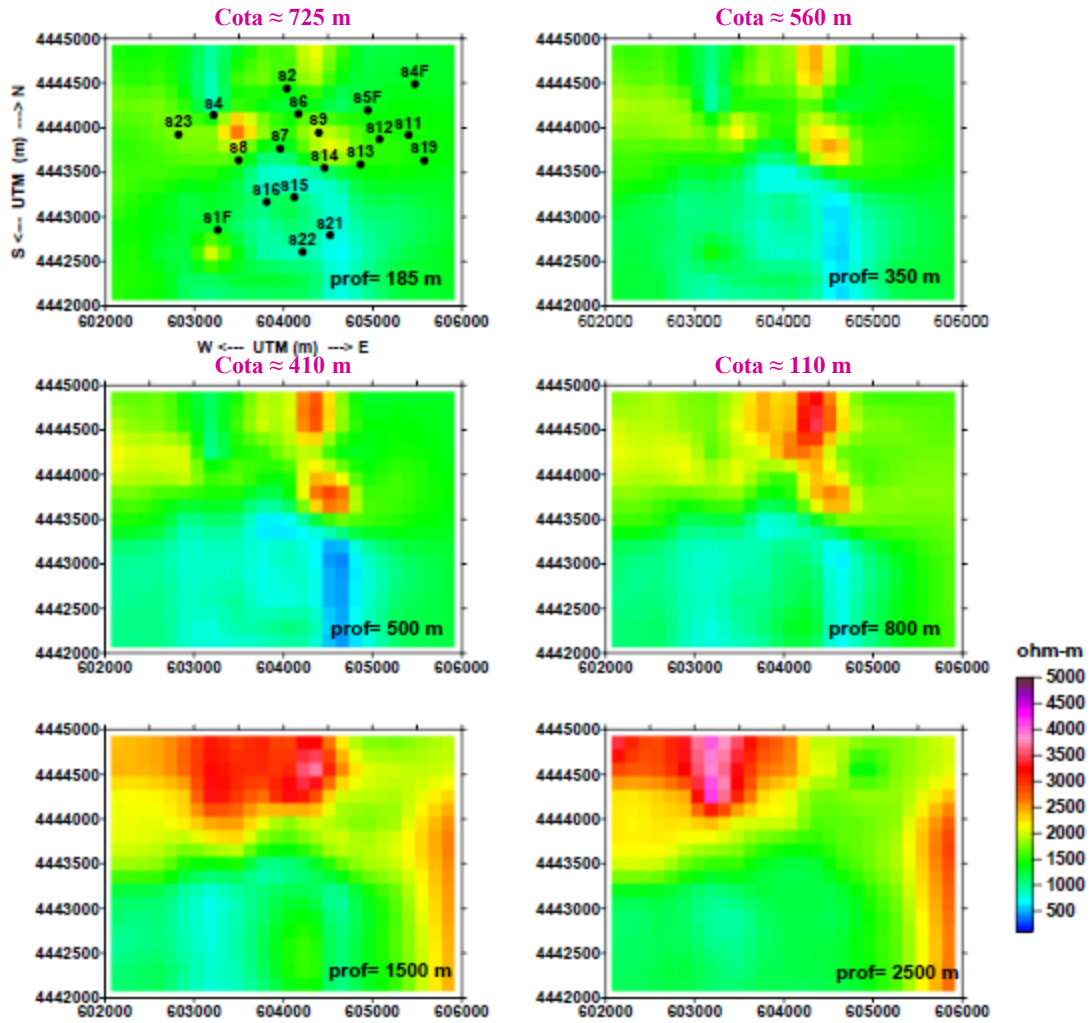
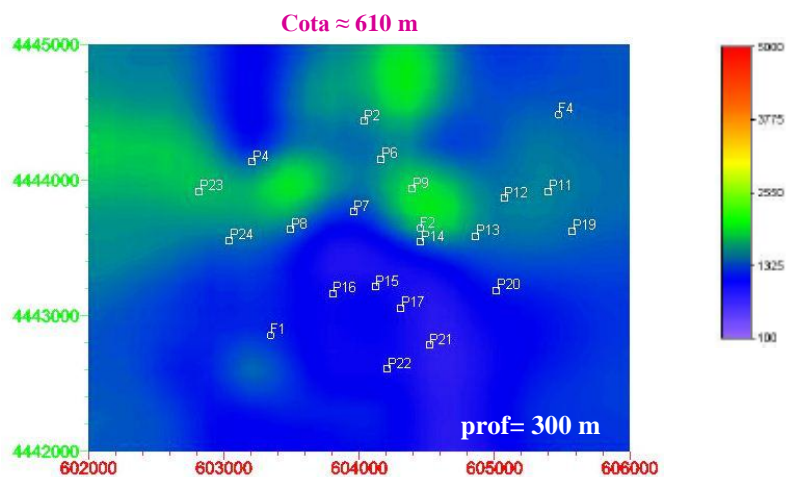
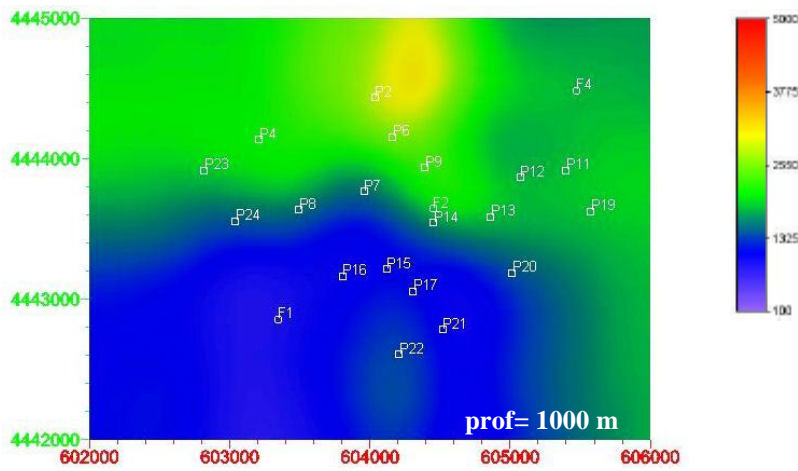
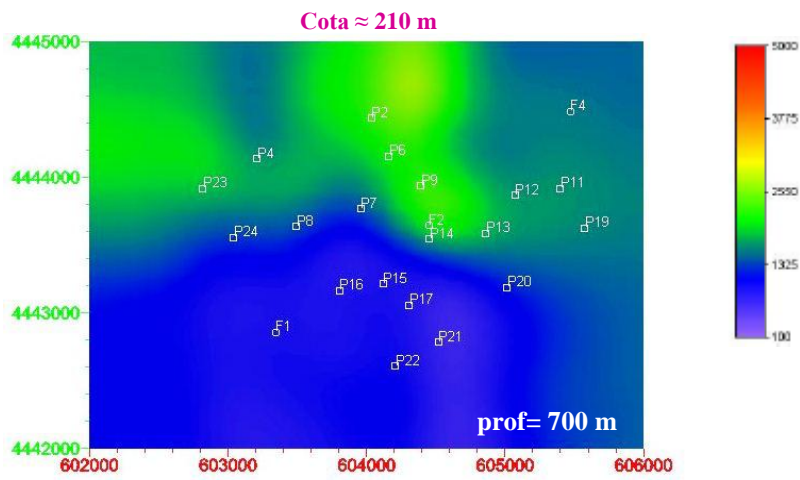
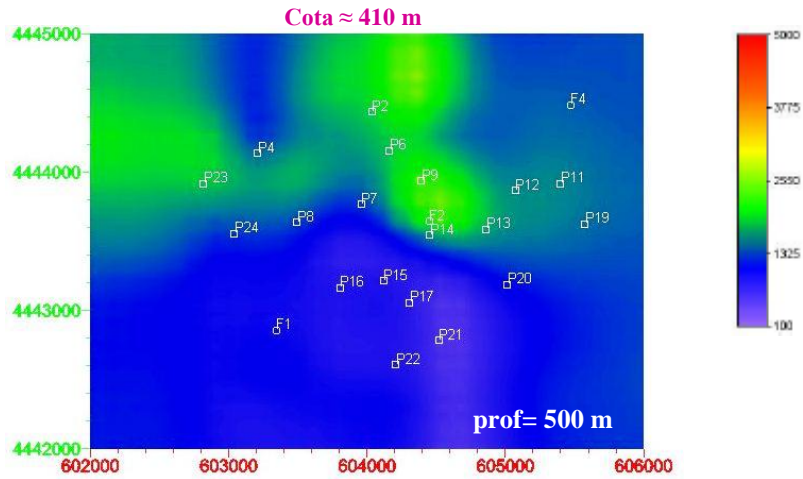
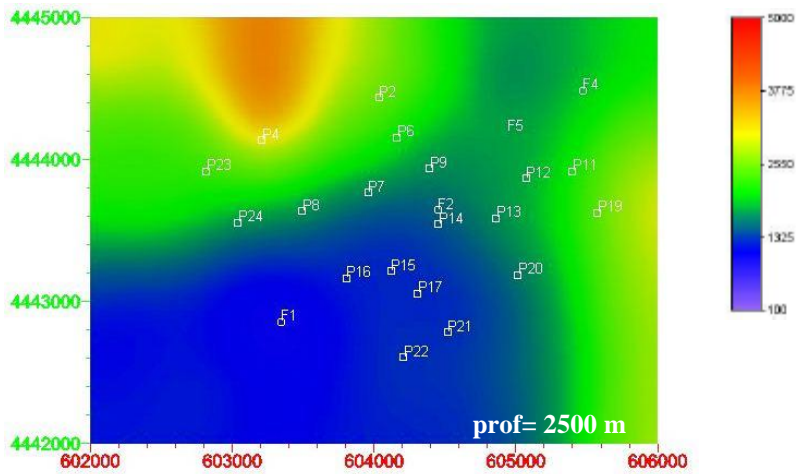
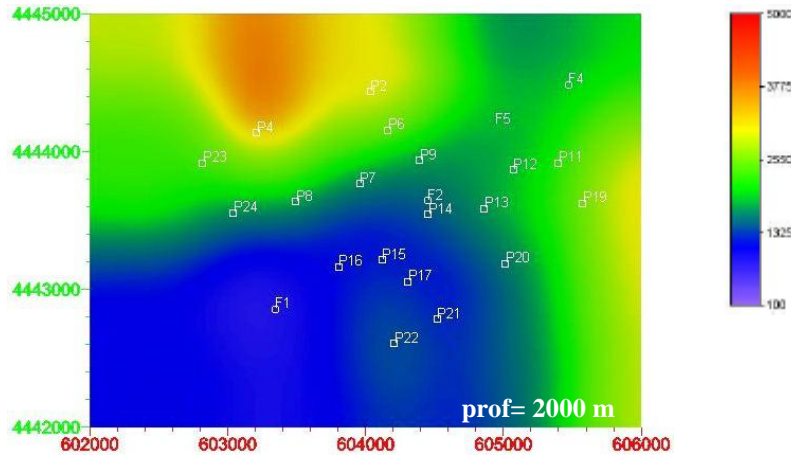
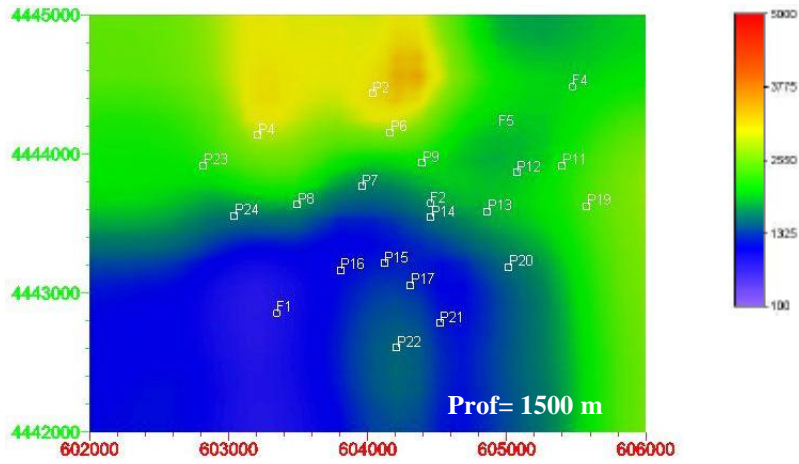


Figura 75 – Cortes horizontais do modelo 3D para as profundidades de 185 m, 350 m, 500 m, 800 m, 1500 m e 2500 m. A localização das estações (representadas por pontos pretos) observa-se apenas na secção a 185 m de profundidade. As estações assinaladas por F fazem parte do Perfil Inicial. A estação 2F do perfil inicial não se encontra na figura por uma questão de representação, uma vez que a sua localização quase coincide com a da estação 14.







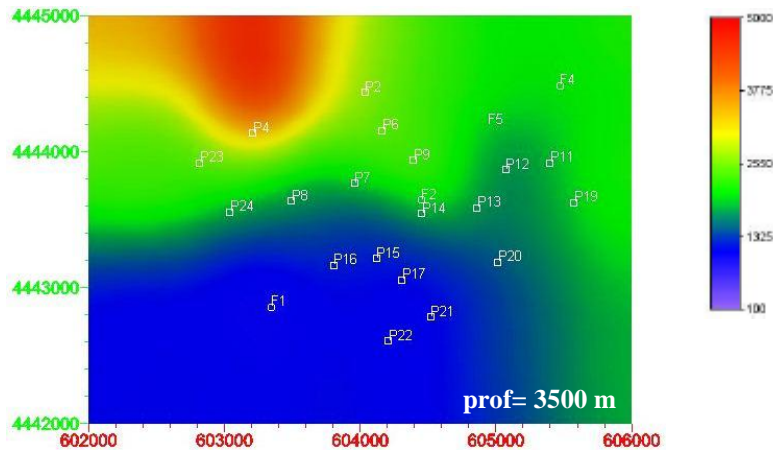


Figura 76 – Cortes horizontais do modelo 3D para as profundidades de 300 m, 500 m, 700 m, 1000 m, 1500 m, 2000 m, 2500 m e 3500 m. As estações assinaladas com F foram adquiridas no Perfil Inicial, as que estão assinaladas com P foram adquiridas no segundo levantamento (Zona Sul).

3.3.1. Análise do modelo 3D de resistividade

Analisando, numa primeira fase, as secções da figura 75, verifica-se que estas representam profundidades que vão dos 185 m até aos 2500 m.

Na secção dos 185 m de profundidade, pode-se observar a existência de duas anomalias resistivas (representadas a amarelo/vermelho), situadas entre as estações 14 e 9 (R4) e entre as estações 8 e 4 (R5), respectivamente, e com valores de resistividade que variam entre os 2000 e 3000 Ohm.m. Observa-se também, a existência de uma zona condutora (representada a azul), que se localiza na zona das estações 15, 16, 21 e 22, com valores de resistividade de aproximadamente 500 Ohm.m.

Quando analisamos a secção dos 350 m de profundidade, verifica-se que o corpo resistivo R4 aumenta ligeiramente as suas dimensões, passando a ter valores de resistividade mais acentuados no seu centro, enquanto que o corpo resistivo R5 diminui acentuadamente as suas dimensões e valor de resistividade, parecendo ser um corpo bastante superficial, pois desaparece totalmente na secção dos 500 m de profundidade.

Com o aumento da profundidade, o corpo R4 aumenta a sua expressão, parecendo prolongar-se para norte a 800 m de profundidade. Dos 1500 aos 2500 m de profundidade, o corpo resistivo R4 já não se observa, verificando-se a existência de dois corpos resistivos de grandes dimensões, a NW e a E. Estes corpos, contudo,

Paula Póvoa

situam-se já a profundidades consideráveis, em que a resolução do modelo diminui devido à diminuição de energia com o aumento de profundidade. As gamas de frequências que foram processadas também não atingem estas profundidades e, para além disso, estes corpos resistivos encontram-se nas periferias da área, muito pouco preenchidas com estações MT, representando como tal, estruturas mal resolvidas e mal condicionadas pelos dados.

Relativamente ao corpo condutor identificado na secção a 185 m de profundidade, este mantém-se quando se aumenta a profundidade, começando a difundir-se a partir dos 800 m. Aos 2500 m de profundidade este corpo revela-se quase inexistente.

As secções do modelo da figura 76 abrangem profundidades que vão desde os 300 até aos 3500 m.

A partir da análise destas secções, visualiza-se uma evolução em profundidade, das estruturas condutoras muito semelhante à que se observou nas secções anteriores: um aumento das dimensões e valores de resistividade do corpo R4 e sua prolongação para norte, e o desaparecimento do corpo R5. Também aqui se observa o corpo condutor identificado nas secções anteriores, que aos 700 m de profundidade deixa de ter expressão.

Nas secções mais profundas, 2500 e 3500 m de profundidade, observam-se igualmente os mesmos corpos resistivos periféricos mal resolvidos e mal condicionados pelos dados.

Outra forma de visualizar as estruturas do modelo 3D é sob a forma de isosuperfícies para determinados valores de resistividade aparente.

Nas figuras de 77a a 77e observam-se cinco isosuperfícies distintas.

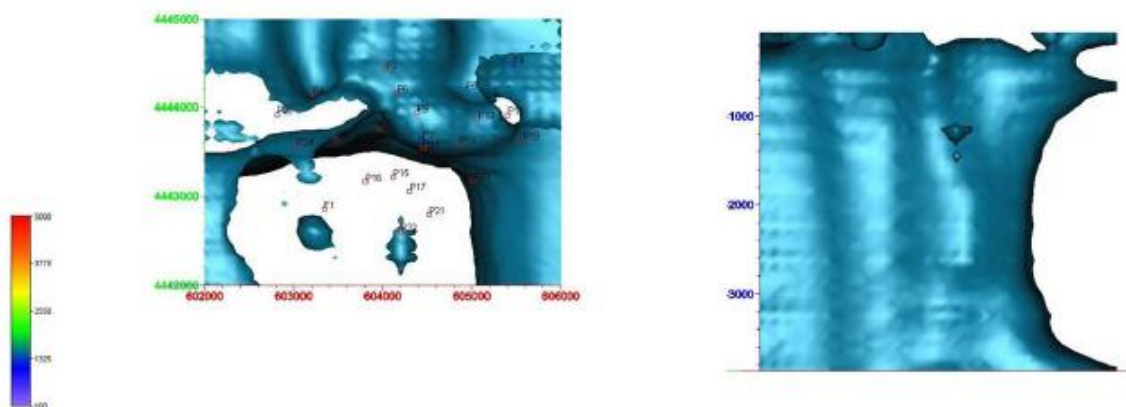


Figura 77a – Isosuperfícies correspondente à resistividade de 1500 Ohm.m.

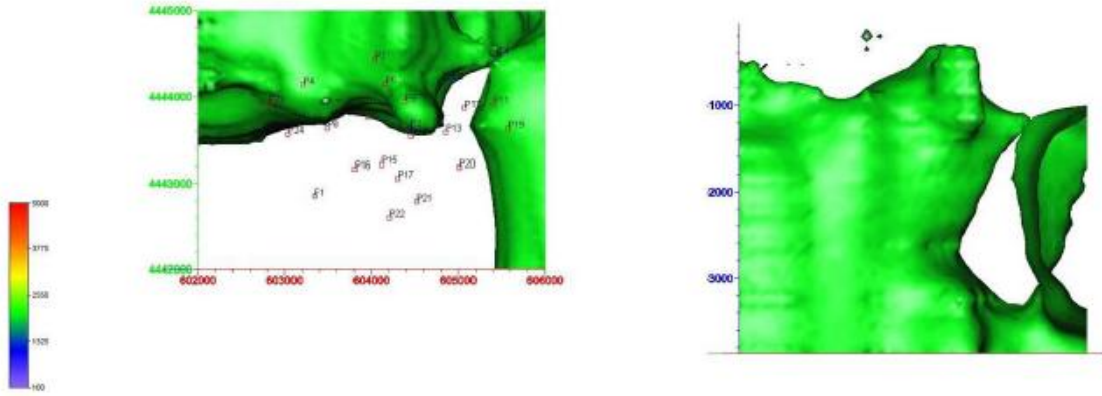


Figura 77b – Isosuperfícies correspondente à resistividade de 2000 Ohm.m.

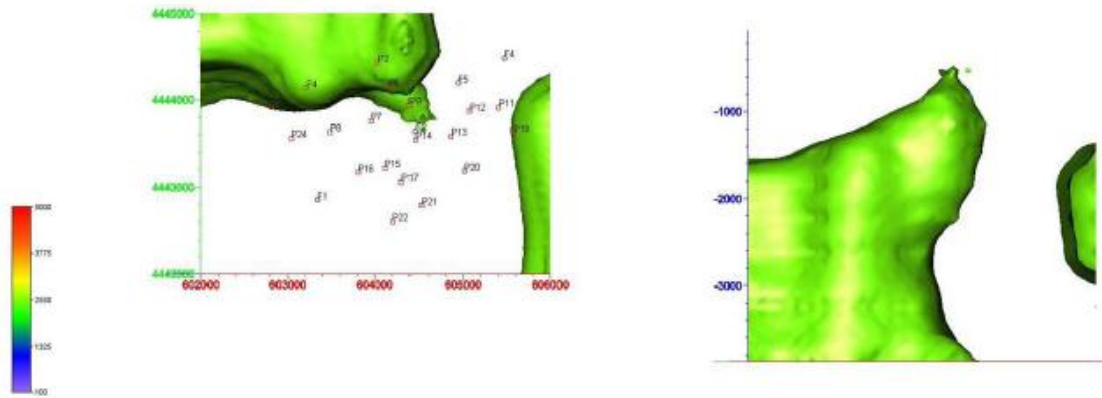


Figura 77c – Isosuperfícies correspondente à resistividade de 2500 Ohm.m.

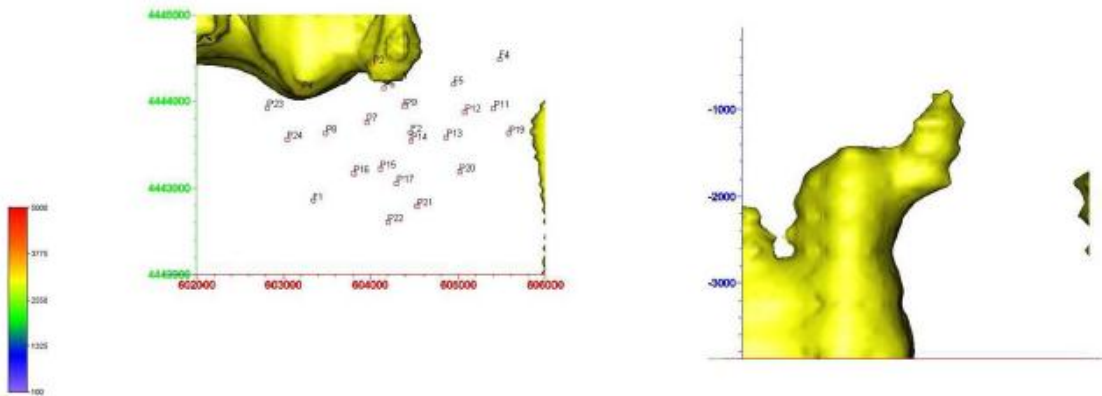


Figura 77d – Isosuperfícies correspondente à resistividade de 3000 Ohm.m.

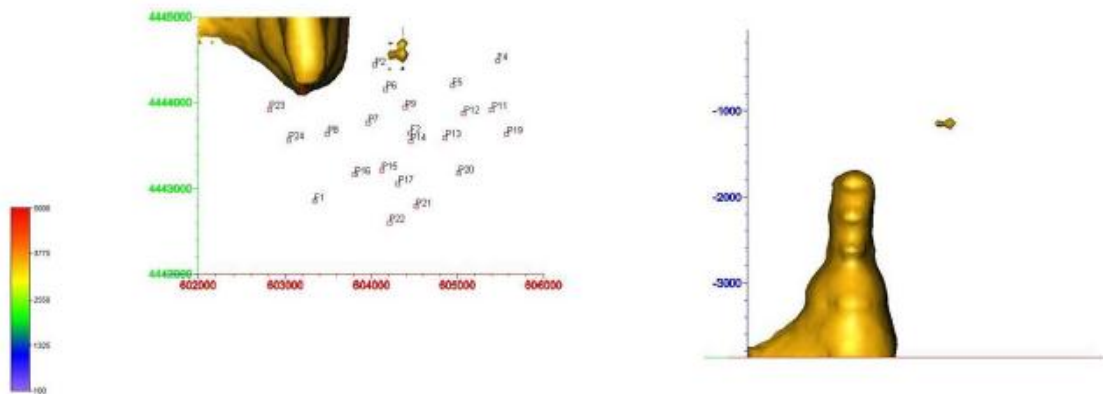


Figura 77e – Isosuperfícies correspondente à resistividade de 3500 Ohm.m.

Nas secções horizontais do modelo 3D observou-se a existência de um corpo resistivo (R4) com valores de resistividade que variam em profundidade, aproximadamente desde os 2000 aos 3000 Ohm.m, deixando de se observar a profundidades acima dos 800 m. Este corpo situa-se, como já visto, entre as estações 14, 9 e 2F.

Este corpo também se observa quando analisamos as isosuperfícies, constatando-se que com este tipo de interpolação, os seus valores de resistividade são um pouco mais baixos, variando entre os 1500 e os 2500 Ohm.m, uma vez que as isosuperfícies com valores de resistividade superiores a 2500 Ohm.m não englobam estas estações. O corpo R5 também não toma expressão nas isosuperfícies, pois nenhuma das que se encontram representadas, engloba um corpo entre as estações 8 e 4.

O corpo condutor identificado anteriormente, não se observa em nenhuma isosuperfície, pois os seus valores de resistividade são aproximadamente 500 Ohm.m e a isosuperfície de resistividade mais baixa representada na figura 77, é a de 1500 Ohm.m.

Por fim, pode-se constatar que a maioria da área da Zona Sul é constituída por materiais rochosos com resistividade até aos 1500 Ohm.m, pois não se tendo informação abaixo desse valor, esta isosuperfície é a que possui uma maior representatividade nesta área.

Quando se observam as isosuperfícies de resistividade mais elevada (acima dos 2500 Ohm.m), a ocupação destas na Zona Sul, vai diminuindo, restringindo-se às zonas periféricas a NW e E. Estas mesmas áreas já tinham sido anteriormente identificadas, na análise das secções horizontais do modelo 3D, a profundidades mais elevadas.

Assim sendo, quando se comparam as secções horizontais do modelo 3D com as isosuperfícies, verifica-se que existe coerência nos resultados, pois as diferenças são

mínimas. Estas pequenas diferenças devem-se aos diferentes tipos de interpolação que foram efectuados para obter as secções do modelo 3D e as isosuperfícies.

3.3.2. Discussão/interpretação do modelo 3D de resistividade

Na discussão dos modelos 2D de resistividade, identificou-se um corpo resistivo (R1) aproximadamente entre a cota dos 700 a 300 m, na parte sul do Perfil Inicial e situado por baixo da estação 2 deste perfil. Esta zona foi considerada de interesse, pois este corpo resistivo foi interpretado como sendo uma possível intrusão granítica, ou como sendo um prolongamento da que já se conhece. Como tal, o levantamento MT da Zona Sul efectuou-se com o objectivo de confirmar a existência deste corpo e proceder a uma melhor caracterização do mesmo.

Depois da análise do modelo 3D podemos concluir que de facto existe um corpo resistivo (R4) nessa mesma zona (equivalente ao corpo R1), mas quando se comparam as características que este apresenta com as iniciais observadas nos modelos 2D, consegue-se perceber que:

- o corpo resistivo parece ser ligeiramente mais superficial do que se pensava, pois segundo o modelo 3D este corpo aparece, pelo menos a uma profundidade de 185 m e, situando-se as estações 2 do Perfil Inicial e a estação 14 da Zona Sul à cota dos 995 m, a cota correspondente será a de 810 m, aproximadamente;
- a profundidade a que termina parece ser substancialmente menor, pois nos modelos 2D este corpo parece prolongar-se verticalmente até uma profundidade de 2400-3000 m, e no modelo 3D ele parece não ultrapassar os 800 m de profundidade;
- os seus valores de resistividade parecem ser um pouco menores dos que se supunham inicialmente, visto que nos modelos 2D este corpo apresenta valores de resistividade geralmente acima dos 2048 Ohm.m, podendo ultrapassar os 4096 Ohm.m e, com base nas secções horizontais do modelo 3D, este corpo parece não ultrapassar os 3000-3500 Ohm.m. Ainda, se se tiver em conta os resultados das isosuperfícies, o corpo R4 não ultrapassa os 2500 Ohm.m.

Com base nas observações anteriores conclui-se que as dimensões do corpo resistivo R1/R4, da Zona Sul, são bastante menores do que se inicialmente se apresentavam. Embora este, no modelo 3D atinja valores de resistividade aparente um pouco mais baixas do que nos modelos 2D, nomeadamente no modelo 3, estes valores continuam a ser coerentes para um granito.

O facto deste corpo, no modelo 3D, em profundidade se prolongar para norte, vai de encontro com a hipótese da existência de uma única intrusão, de grandes dimensões (em forma de batólito), apresentada na interpretação do modelo 3 (2D), pois nesse modelo, a intrusão revela continuidade para norte desse perfil.

Relativamente à anomalia mais condutora que se observa nas secções horizontais do modelo 3D (a azul), esta poderá explicar-se devido à presença de sulfuretos disseminados nessa zona, levando ao incremento dos valores de resistividade. Kelly e Rye (1979) identificam disseminações de pirite e arsenopirite nos xistos e grauvaques da Panasqueira, resultantes de alteração hidrotermal.

É ainda importante referir, que as falhas que estão cartografadas na Zona Sul (Falha do Vale das Freitas, Falha das Lameiras, Falha 3W e Falha Principal), não se visualizam no modelo 3D, pois estas atingem apenas zonas periféricas da área, onde quase não existem estações MT, como se pode observar na figura 78.

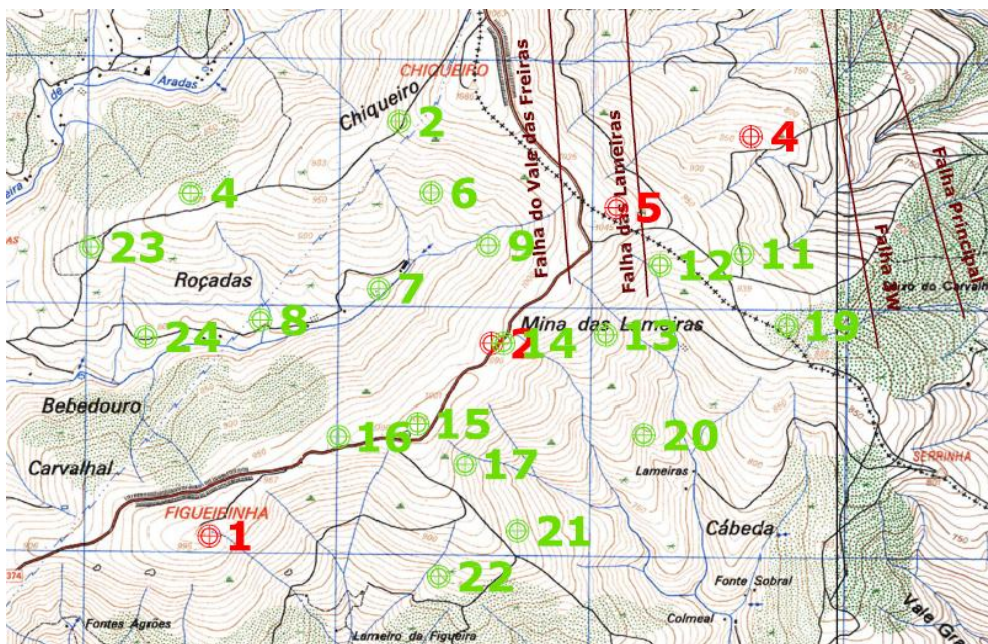


Figura 78 – Localização das Falhas e das estações de MT na Zona Sul. Estão representadas a vermelho, as estações do Perfil Inicial e a verde, as estações da Zona Sul.

Conclusões

Sendo o objectivo principal deste trabalho a obtenção de modelos de resistividade que permitissem localizar, no Couto Mineiro da Panasqueira, corpos resistivos em profundidade, a análise e interpretação dos dados MT e dos modelos de resistividade, permitem:

- concluir acerca da eficácia do método MT na resolução da problemática, no ambiente geológico em questão;
- concluir acerca da coerência entre os modelos de resistividade 2D e 3D;
- sugerir futuros trabalhos de prospecção face aos resultados obtidos no presente estudo.

Quando se realiza uma campanha de prospecção MT em condições semelhantes às existentes na Panasqueira, são de esperar algumas dificuldades. As características geomorfológicas da região, nomeadamente a topografia extremamente irregular, dificultam o processo de aquisição dos dados e, o ruído electromagnético bastante acentuado, cujas fontes foram já identificadas, diminui a qualidade dos dados, como se pode observar tanto nas séries temporais como nas curvas de resistividade aparente. Mesmo assim, pode-se concluir que o método MT se revelou bastante eficaz, pois os modelos 2D obtidos revelaram três anomalias resistivas, sendo que a localização de uma delas corresponde à localização da cúpula do granito da Panasqueira. As zonas de falha que cruzam o perfil também se encontram bem representadas nos modelos. Assim, os modelos obtidos são bastante coerentes com a informação geológica conhecida. Os restantes dois corpos resistivos assinalados nos modelos localizam-se a norte e a sul do respectivo perfil.

Relativamente ao modelo 3D obtido para a Zona Sul, pode-se observar que este mantém o corpo resistivo que se observa nos modelos 2D a Sul, com a mesma localização, ainda que com dimensões e valores de resistividade um pouco menores. Em profundidade este corpo prolonga-se para norte. Também no modelo 3 (2D) este corpo se prolonga para norte, em direcção à zona de falha da Falha das Lameiras. Como tal, podemos concluir que os resultados obtidos nos modelos 2D e 3D são bastante coerentes entre si.

Os modelos de resistividade permitem-nos supor e criar hipóteses explicativas para os contrastes laterais de resistividade, no entanto não nos permitem concluir acerca das litologias em profundidade. Assim sendo, torna-se necessário recorrer a outros métodos de prospecção, quer para definir melhor a localização dos corpos resistivos evidenciados neste trabalho, quer para confirmar a sua natureza geológica. Assim, sugere-se para trabalhos futuros de prospecção:

- a realização de perfis sísmicos, uma vez que as impedâncias acústicas são diferentes em corpos granitóides e xistos. Estes perfis poderão ser úteis numa melhor caracterização dos limites laterais e verticais dos corpos, que neste trabalho se assumiram como sendo intrusões graníticas;
- a realização de sondagens mecânicas perto das estações 2 (Perfil Inicial) e 14 (Zona Sul), para confirmar a litologia do corpo resistivo que se visualiza nos modelos, debaixo destas estações. Dado o prolongamento do corpo resistivo para norte, que se verifica no modelo 3D, estas sondagens em profundidade deverão ser inclinadas para norte a partir dos 400 m.

Bibliografia

Almeida, E., 2009. Caracterização electromagnética da Zona Ossa Morena, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Tese de doutoramento.

Bloot, C. & Wolf, L. C., 1953. Geological features of the Panasqueira tin-tungsten ore-occurrence (Portugal). Bol. Soc. Geol. Portg., 11/1: 2-75

Bussink, R. W., Kreulen, R., Jong, A. F. M., 1984. Gas analyses, fluid inclusions and stable isotopes of Panasqueira W-Sn deposits, Portugal, Bull. Minéral., 107:703-713.

Carta Geológica de Portugal, escala 1:500 000, 1992. Serviços Geológicos de Portugal/ Instituto Geológico e Mineiro.

Cavey, G. & Gunning, D., 2002. Technical Report on Panasqueira Mines, Salish Ventures Inc., Orequest.

Clark, A. H., 1964. Preliminary of the temperatures and confining pressures of granite emplacement and mineralization, Panasqueira, Portugal. Trans. Inst. Min. Metallurg., 73: 813-824.

Clark, A. H., 1965. Notes on Mineralogy of Panasqueira tin-tungsten deposit, Portugal: The occurrence of magnetite, stibnite, bertrandite, scheelite, tungstate, hidrotungstite and scorodite, Comunicação dos Serviços Geológicos de Portugal, XL VIII.

Conde, L. N., Pereira, V., Ribeiro, A. & Thadeu, D., 1971. Jazigos hipogénicos de estanho e volfrâmio. Livro-Guia da excursão nº 7. Congr. Hisp. - Luso-Amer. Geol. Econ., D. G. Min. Serv. Geol.

Ferreira, N., Iglesias, M., Noronha, F., Pereira, E., Ribeiro, A. & Ribeiro, M.L., 1987. Granitóides da Zona Centro Ibérica e seu enquadramento geodinâmico. In: Geologia de los Granitóides y Rocas asociadas dei Macizo Hespérico. (eds Bea, et ai.) (Libro Homenaje a L.C. Garcia de Figuerola): 37-51.

Foxford, K. A., Nicholson, R. & Polya, D. A., 1991. Textural evolution of W-Cu-Sn-bearing hydrothermal veins at Minas da Panasqueira, Portugal. Miner. Mag., 55: 435-445.

Foxford, Nicholson, Polya & Hebblethwaite, 2000. Extensional failure and hydraulic valving at Minas da Panasqueira, Portugal: evidence from vein spatial distributions, displacements and geometries. *J. Struct. Geol.*, 22:1065-1086.

Kelly, W. C., 1977. The relative timing of metamorphism, granite emplacement and hydro thermal ore deposition in the Panasqueira district (Beira Baixa, Portugal). *Comun. Serv. Geol. Portg.*, 61: 239-244.

Kelly, W.C. & Rye, R.O., 1979. Geologic, fluid inclusions and stable isotope studies of the tin-tungsten deposits of Panasqueira, Portugal. *Econ.Geol.*, 74: 1721-1822.

Lourenço, A., 2002. Paleofluidos e mineralizações associadas às fases tardias da Orogenia Hercínica, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Tese de Doutoramento.

Marignac, C., 1982. Geologic, fluid inclusions and stable isotope studies of the Panasqueira tungsten-tin deposits, Portugal- A discussion. *Econ. Geol.*, 77: 1263-1266.

Neiva, A. M. R., 1987. Geochemistry of greisenized granites and metasomatic schist of tungsten-tin deposits in Portugal. In: *Chemical transport in metassomatic processes*, (éd. H. C. Helgeson): 681-699.

Noronha, F.; Dória, A.; Dubessy, J. & Charoy, B., 1992. Characterisation and timing of the different types of fluids present in the barren and ore-veins of the W-Sn deposit of Panasqueira, Central Portugal. *Mineral. Deposita*, 27: 72-79.

Oosterom, M. G., Bussink, R. W., 1984. Lithochemical studies of aureoles around the Panasqueira tin-tungsten deposit, Portugal, *Mineralium Deposita*, 19:283-288.

Orey, F.C., 1967. Tungsten-tin mineralization and paragenesis in the Panasqueira and Vale de Ermida mining districts, Portugal. *Com. Serv. Geol. Portugal*, 52: 117-167.

Polya. D. A., 1988. Compositional variations in wolframites from the Barroca Grande mine, Portugal: evidence for fault-controlled ore formation, *Mineralogical Magazine*, 52: 497-503.

Polya, D., 1989. Chemistry of the main-stage ore-forming fluids of the Panasqueira W-Cu(Ag)-Sn Deposit, Portugal: Implications for models of ore genesis. *Econ. Geol.*, 84:1134-1152.

Polya, D., Foxford, K., Stuart, F., Boyce, A. & Fallick, A., 2000. Evolution and paragenetic context of low δD hydrothermal fluids from the Panasqueira W-Sn deposit, Portugal: New evidence from microthermometric, stable isotope, noble gas and halogen analyses of primary fluid inclusions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64: 3357-3371.

Ribeiro, A. & Pereira, E., 1982. Controlos paleogeográficos, petrológicos e estruturais na génese dos jazigos portugueses de estanho e volfrâmio. *Geonovas*, 1/3: 23-31.

Simpson, F. & Bahr, K., 2005. *Practical Magnetotellurics*, Cambridge University Press, 2005.

Telford, Geldart & Sheriff. 1990. *Applied Geophysics*, 2nd Edition. S.1. : Cambridge University Press, 1990.

Thadeu, D., 1951a. Geologia do Couto Mineiro da Panasqueira. *Comua Serv. Geol. Portg.*, 32: 5-64.

Thadeu, D., 1965. Características da mineralização hipogénica estano-volframítica portuguesa, *Bol. Ord. Eng.*, X, 1.

Thadeu, D., Conde, L. N., Ribeiro, A., 1971. Jazigos Hipogénicos de Estanho e Volfrâmio, Congresso Hispano-Luso-Americano de Geologia Económica, Nº 7.

Anexos

Anexo A – Localização geográfica das estações MT do Perfil Inicial

Sondagem	Latitude	Longitude	Latitude	Longitude	Cota (m)
1	40°7'46.92"	-7°47'13.23"	2949973	5129282	991
2	40°8'12.00"	-7°46'25.90"	3061719	5207082	995
4	40°8'38.89"	-7°45'42.33"	3164519	5290444	847
5	40°8'29.69"	-7°46'4.89"	3111234	5261847	1025
6	40°9'5.60"	-7°45'46.54"	3154212	5372788	760
7	40°9'18.34"	-7°45'38.29"	3173574	5412164	755
8	40°9'32.98"	-7°45'17.50"	3222586	5457527	861
9	40°9'44.80"	-7°45'25.65"	3203145	5493904	941
10	40°9'54.48"	-7°45'10.55"	3238751	5523912	880
11	40°10'.12.9"	-7°45'9.14"	3241845	5580742	705
12	40°10'33.84"	-7°45'9.90"	323977	5645322	560
13	40°10'49.81"	-7°44'50.49"	3285481	5694778	590
14	40°11'6.13"	-7°44'20.40"	3356446	5745427	550
15	40°10'54.76°	-7°44'2.60"	3398712	5710545	475

Anexo B – Localização geográfica das estações MT da Zona Sul.

ÁREA SUL			
Ponto	Longitude	Latitude	Altitude (m)
1	----	----	----
2	604037	4444440	985
3	----	----	----
4	603214	4444143	915
5	----	----	----
6	604167	4444155	900
7	603963	4443765	830
8	603496	4443635	795
9	604395	4443944	920
10	----	----	----
11	605403	4443919	940
12	605076	4443871	920
13	604864	4443588	920
14	604459	4443550	995
15	604122	4443221	995
16	603809	4443167	975
17	604312	4443060	950
18	----	----	----
19	605580	4443632	905
20	605018	4443185	795
21	604522	4442794	890
22	604212	4442607	810
23	602821	4443923	835
24	603042	4443563	770